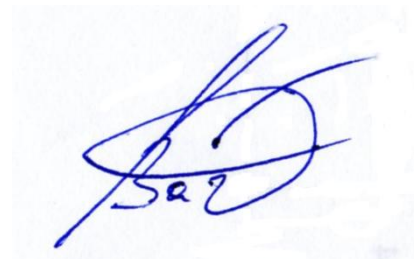


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С. М. КИРОВА

На правах рукописи



ВАГИЗОВ МАРСЕЛЬ РАВИЛЬЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОД ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ**

Специальность 1.6.20 – Геоинформатика, картография

Диссертация на соискание учёной степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор,

Истомин Евгений Петрович

Санкт-Петербург
2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ	Ошибка!
Закладка не определена.	
1.1. Отечественный и мировой опыт применения геоинформационных технологий для управления лесным хозяйством.	21
1.2. Управление лесным хозяйством на базе геоинформационного моделирования лесных экосистем	41
1.3. Проблематика технологий геоинформационного моделирования лесных экосистем	49
1.4. Постановка научной проблемы	56
1.5. Выводы по Главе 1	58
ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИЯ, ПРИЗНАКИ И МЕТОД ГЕОИНФОРМАЦИ- ОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ	59
2.1. Концепция геоинформационного моделирования лесных экосистем	63
2.2. Признаки характеризующие процесс геоинформационного моделирования лесов	79
2.3. Метод интерактивного геомоделирования лесных экосистем.....	88
2.4. Инфологическая модель компонентов геоинформационного моделирования лесных экосистем.....	96
2.5. Моделирование составных объектов лесной экосистемы	80
2.6. Типы геоинформационных моделей лесной экосистемы.	84
2.7. Трёхмерные модели хвойных пород деревьев для геоинформационной модели лесной экосистемы	90
2.8. Трёхмерные модели лиственных пород деревьев для геоинформационной модели лесной экосистемы	105
2.9. Выводы по Главе 2	115
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ...	117
3.1. Геоинформационное обеспечение технологического процесса моделирования лесной экосистемы	121
3.2. Технологическое обеспечение формирования геопространственных данных	130

3.3. Формирование данных рельефа для геоинформационного моделирования и управления лесной экосистемой.....	135
3.4. Формирование данных дистанционного зондирования Земли для геоинформационного моделирования и управления лесной экосистемой	154
3.5. Дистанционная модель лесной экосистемы.	159
3.6. Макромодель лесной экосистемы.	178
3.7. Микромодель лесной экосистемы.....	189
3.8. Выводы по Главе 3	198
ГЛАВА 4. ИНТЕГРАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В СРЕДУ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	
Ошибка! Закладка не определена.	
4.1. Компоненты интеграции данных в геоинформационную модель	201
4.2. Интеллектуальная геоинформационная система визуализации данных геоинформационного моделирования.....	209
4.3. Библиотеки машинного обучения и их применение в задаче геоинформационного моделирования лесных экосистем.....	218
4.4. Верификация геоинформационных моделей лесных экосистем	230
4.5. Выводы по Главе 4	233
ГЛАВА 5. ЕДИНЫЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ НА БАЗЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ.....	
5.1. Система связей элементов единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством	237
5.2. Инфраструктура единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством	239
5.3. Геоинформационная модель лесной экосистемы как компонент системы управления в едином геоинформационном центре	248
5.4. Рекомендации по развитию технологии управления лесными экосистемами на основе геоинформационного моделирования	255
5.5. Выводы по Главе 5	257
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	258
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ	260

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Необходимость геопространственного представления данных лесного фонда является остро необходимой для научно-технического развития лесной отрасли. Представление геопривязанной информации о лесном фонде для специалистов лесного хозяйства в виде новых цифровых интерактивных моделей, для наиболее комплексного восприятия информации о лесе и отдельному отображению характеристик качественного состава лесов по выбранной территориальной единице управления лесами, позволит повысить процесс управления лесными ресурсами, увидеть ресурс управления с разных позиций, раскрыть его свойства.

На сегодняшний день существует несколько объективных проблем в лесном хозяйстве, среди некоторых из них можно выделить фундаментальные проблемы, влияющие на общее развитие отрасли.

Отсутствие достоверной информации о лесном фонде, дефицит высококвалифицированных кадров, отсутствие высокотехнологичных, инновационных решений и несвоевременное внедрение передовых, отечественных технологий в лесную отрасль, не позволяет эффективно и на должном уровне поддерживать процесс управления лесными ресурсами для развития экономического потенциала лесного сектора.

Программно-аппаратные средства, определяют новые возможности и актуальные подходы для обработки, представления и анализа геопространственной информации о лесных экосистемах. Особенность современного развития геоинформационных технологий состоит в том, что возможным становится оперирование и обработка сверхбольших объёмов информации (Big Data).

Следующая особенность нынешнего развития информационных технологий является в новых технологических возможностях визуализации геоинформации в интересах лица принимающего решения. Стремительно развивающиеся технологии моделирования на основе трёхмерной графики в сочетании с общим

увеличением производительности аппаратной составляющей графических процессоров, средств вычислительной техники позволяют не просто сформировать абстрактное представление о моделируемом объекте в виде его цифровой модели, но и наполнить такую модель динамическими свойствами, отражающими её изменения в пространстве и времени.

К новым возможностям можно отнести и развитие методов машинного обучения в лесном хозяйстве, что принесёт особый вклад в данную отрасль, в сочетании с двумя рассмотренными выше особенностями, новые технологии позволяют исследовать лесные экосистемы наиболее точно и комплексно.

Использование этих особенностей предполагает синтез нескольких научно-технологических подходов, обеспечивающих формирование нового представления геоинформации в виде цифровых геоинформационных моделей лесных экосистем, при помощи которых возможно оценивать классические характеристики древостоя с визуальным сопровождением моделей лесных экосистем на основе поступающих сведений в среду геоинформационного моделирования. Отсутствие комплексного подхода применения данных технологий в лесном секторе определяет актуальность диссертационного исследования.

Степень разработанности проблемы. Научные исследования отечественных учёных широко разрабатываются отдельными научными школами и исследователями, значительный вклад в развитие методов и технологий в области обработки геоинформации в интересах управления территориями оказали учёные: Бескид П.П. [1-3], Истомин Е.П. [4,5], Соколов А.Г. [271,272], Розенберг И.Н. [279,318], Шайтура С.В. [299,300] в области развития методов геопространственного обеспечения территорий Карпик А.П. [6,7], Биденко С.И. [273,274]. В области проблем и методов обработки больших объёмов геопространственной информации Майоров А.А. [8,9], в области формирования объектно-ориентированных моделей в геоинформационных системах Присяжнюк С.П. [10,11]. Можно отметить, не только сформированные научные труды данных авторов, но и их практические изобретения, направленные на решение крупных

научно-практических и инженерных задач [12-14], предлагаемые решения имеют важное значение для экономического развития страны.

В задачах развития геоинформационных технологий в области лесного хозяйства оказывающих существенное влияние на методологическое обеспечение отрасли современными ГИС-технологиями: Алексеев А.С. [15-16]. В области обеспечения картографирования лесного покрова и развития дистанционных методов анализа лесной растительности: Барталёв С.А. [18,19], Курбанов Э.А. [20,21] Любимов А.В. [22,23], Черниховский Д.М. [24,25]. В области развития информационных технологий в лесном хозяйстве: Черных В.Л. [275,276], Заяц А.М. [277,278]. Исследования данных авторов направлены как на технологическое обеспечение различными методами обработки данных дистанционного зондирования Земли, так и на анализ структуры лесов и связей с другими компонентами лесных экосистем, таких как ландшафтная структура лесов, производительность древостоев их связь с морфометрическими характеристиками рельефа, разработками технологий беспроводных сенсорных сетей для мониторинга лесных территорий.

Необходимо отметить, что на развитие геоинформационных технологий в целом, влияет не только развитие отечественных научных школ. В России сильно развита ассоциация ГИС-любителей и ГИС-специалистов, существующие объединения и сообщества [26] публикуют не только периодические материалы и методологические подходы при работе с картографическими материалами и геопространственными данными, но и позволяют обмениваться накопленным опытом работы в геоинформационных системах большому количеству специалистов из разных сфер и областей.

Среди зарубежных исследователей активно развивающих направления по обработке геопространственной информации лесных экосистем занимают исследователи и ученые из стран с интенсивным ведением лесного хозяйства: Финляндия - А. Kangas, М. Holopainen, Канада - Michael A. Wulder, Ronald J. Hall, Австралия - Laurie A. Chisholm, Himlal Baral, Швейцария - А. Hill, Япония - Shiming Li, Kotaro Iizuka и учёные других стран.

В результате синтеза информационных технологий и научных достижений в области геоинформатики, большого объёма накопленной информации о лесных экосистемах и новых возможностей визуализации и обработки геопространственной информации появляется возможность в разработке и применении нового методологического подхода в интересах управления лесными землями. Применяя технологии геоинформационного моделирования, к основному объекту управления, которым являются различные лесные экосистемы возможно достичь эффективного способа управления и стратегическим развитием территорий.

Следует отметить, что исследования зарубежных учёных в большей степени сконцентрированы на технологиях в интересах точного картирования и инвентаризации лесов, оценки биомасс растительности на основе различных подходов обработки данных дистанционного зондирования Земли и технологий лазерного сканирования при помощи лидаров [27-30] активно и успешно применяющихся в лесном хозяйстве с 2010-ых годов. Однако, это не единственные научные подходы из возможных способов представления информации о лесах, данные подходы развиваются на базе обработки информации полученных посредством формирования облака точек, данный подход имеет так же некоторые недостатки. В представляемой диссертационной работе большее внимание уделяется другим подходам по формированию и представлению данных о лесных экосистемах. Этот подход связан с технологическим обеспечением в виде комплексной технологии синтеза и использования гетерогенной системы данных, включающей в себя: данные дистанционного зондирования Земли, полученных также, при помощи беспилотных летательных аппаратов, таксационной информации, данных трёхмерного геоинформационного моделирования, выбранного объекта исследования, на основе применения технологий интеллектуального анализа.

Здесь и далее под гетерогенной системой данных будем понимать набор логически связанных между собой данных, которые могут быть физически распределены по нескольким компьютерам и базам данных. Ключевой

особенностью системы является то, что она формируется из нескольких различных нереляционных баз данных, каждая из которых предназначена для хранения определенных типов данных.

При построении геоинформационных моделей лесных территорий такая система позволяет интегрировать различные типы данных, представляющих информацию о лесах в едином информационном пространстве. Здесь при геоинформационном моделировании формируется определенный каталог гетерогенных данных, объектов моделирования, где возникает проблема корректного, естественного отображения геоинформации и её систематизации, классификации в интересах лица принимающего решения. Именно для решения обозначенных проблем, необходим проработанный методологический аппарат, основанный на сочетаниях технологий геоинформатики, трёхмерного моделирования и анализа больших данных при помощи методов машинного обучения. Необходимость в изменении подходов обработки и представления информации для развития лесного хозяйства с применением цифровых технологий признано большинством экспертов и специалистов лесного хозяйства на государственном уровне в рамках цифровой трансформации лесного комплекса принятой на законодательном уровне [311,312]. Здесь, следует отметить, что цифровизация лесного хозяйства предполагает не только автоматизацию документооборота и логистических решений, но и активное применение современных геоинформационных технологий и технологий геоинформационного моделирования для создания и использования уникальных бизнес-моделей, приводящих к эффективному изменению, ускорению и упрощению деловых процессов в лесной отрасли, ускорению проведения операций, устранения ненужных действий и упорядочению нужных, а также оптимизации в использовании ресурсов [31].

В смежных областях с лесным хозяйством, таким как сельское хозяйство, данные методы успешно используются, раскрывая потенциал их положительного применения и как следствие использования данных технологий повышение экономического потенциала аграрного сектора экономики [32,33]. Визуализация

данных о лесных экосистемах на основе ГИС-технологий в дополнении с данными обработки и представления результатов анализа таксационной и лесоустроительной информации, не только расширяет потенциал ведения избирательного лесного хозяйства, но и позволяет увидеть наиболее глубокое аналитическое понимание процессов происходящих в лесной экосистеме. С проработкой и детализацией внутренних составных компонентов лесных экосистем, что раскрывает новые направления представлений биологии и морфологии леса, на разных масштабах представления формируемой в процессе геоинформационного моделирования информации.

Научная проблема исследования.

Среди недостатков деятельности применения геоинформационных технологий в лесном хозяйстве можно выделить:

1. Большой объём анализируемых данных лесного хозяйства, структура которых состоит из разных форматов.

2. Отсутствие единого общепринятого инструмента для визуализации лесных тематических данных.

3. Ошибки при сборе информации о лесном фонде.

4. Отсутствие должного контроля и актуализации информации о лесном фонде.

5. Отсутствие точного цифрового представления информации в геоинформационной среде с точным отображением характеристик лесных экосистем.

В развитии методов геопространственного представления данных о лесах необходима интенсивная разработка новых подходов по визуализации лесных тематических данных, именно геопространственного представления лесной экосистемы. Формирование комплексного, целостного подхода по обеспечению пространственного представления всех типов собираемой информации о лесе в виде цифровой модели позволяет сформировать наиболее целостное представление у лица принимающего решение. Развитие данных подходов позволит сформировать и выработать наиболее обобщенное и цельное понимание

функций лесных экосистем, а также входящих отдельных компонентов в модели для эффективного управления лесами.

Научная идея работы.

Научная идея работы заключается в формировании нового способа представления геопространственной информации о лесных экосистемах, с целью улучшения представления данных о лесном фонде Российской Федерации. Для повышения экономического, экологического потенциала лесных экосистем и перехода к технологиям ведения избирательного лесного хозяйства, на основе применения технологий геоинформационного моделирования для территориальной организации хозяйственной деятельности и прогнозирования поведения лесных экосистем в долгосрочной динамике.

Объект исследования.

Объектом исследования является геоинформационное представление пространственно-временных данных о лесных экосистемах.

Предмет исследования.

Предметом исследования являются геоинформационные технологии моделирования отдельных лесных экосистем и технологий геопространственной визуализации взаимодействия гетерогенных данных как нового способа геоинформации в виде геопространственных цифровых двойников разработанных в виде комплексных моделей отдельных территориальных единиц, на которых произрастает древесная растительность.

Цель исследования.

Разработка метода и технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем на основе программно-аппаратного и технологического обеспечения, формирование терминологического и понятийного аппарата, описание структурно-логических компонентов предлагаемой технологии для повышения качества управления лесного хозяйства.

Задачи исследования.

Цель исследования может быть достигнута решением следующих задач.

1.Проведением комплексного анализа геоинформационных технологий и опыта их применения в разных странах.

2.Разработка признаков и методов геоинформационного моделирования лесных экосистем.

3.Разработка комплексной технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем.

4.Формирование способов интеграции и верификации системы интеллектуального анализа данных в среду геоинформационного моделирования

5.Разработка концепции единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством на базе геоинформационного моделирования лесных экосистем.

Выполнение поставленных задач исследования позволит получить научные результаты диссертационного исследования.

Научные результаты.

1.Разработана методология построения трёхмерной геоинформационной модели лесных экосистем, которая отличается тем, что:

- введены новые определения и термины, сформированы признаки характеризующие процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем;

- разработана система классификации представления геоинформационных моделей лесных экосистем, определены основные компоненты и инструменты процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем, включающая в себя три типа уровней разграничения геоинформационных моделей лесных экосистем, что позволяет разработать базы данных трёхмерных моделей лесообразующих древесных пород Севера-Запада России.

2.Разработана комплексная технология, включающая в себя три уровня представления данных геоинформационного моделирования лесных экосистем, которая отличается тем, что включает в себя описание процессов моделирования на основе:

- инструментального обеспечения процесса моделирования;

- технологического обеспечения процесса моделирования;
- методологического обеспечения процесса геоинформационного моделирования, что позволяет разработать систему интеллектуального анализа данных в среде геоинформационного моделирования.

3. Разработана система интеллектуального анализа данных, которая является компонентом процесса геоинформационного моделирования и отличается тем, что основывается на авторской математической модели верификации геоинформационных моделей лесных экосистем, что позволяет разработать концепцию единого геоинформационного центра лесного хозяйства

4. Разработана оригинальная концепция по формированию единого геоинформационного центра лесного хозяйства, в котором основным компонентом представления пространственной информации о лесном фонде являются геоинформационные модели лесных экосистем. Предложенная концепция отличается тем, что включает в состав систему интеллектуального анализа таксационных данных в геоинформационной модели, что позволяет использовать, хранить и обрабатывать геопространственную информацию о лесном фонде в новых форматах данных и в наиболее точном и комплексном представлении информации о лесных экосистемах.

Научная новизна исследования.

1. Впервые предложены определения и терминология процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем, признаки характеризующие процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем.

2. Разработана комплексная технология, включающая в себя три уровня представления данных геоинформационного моделирования лесных экосистем содержащая описание процессов моделирования на основе:

- инструментального обеспечения процесса моделирования;
- технологического обеспечения процесса моделирования;
- методологического обеспечения процесса геоинформационного моделирования.

3. Разработана система интеллектуального анализа данных являющаяся компонентом процесса геоинформационного моделирования.

4. Разработана математическая модель верификации геоинформационных моделей лесных экосистем.

5. Предложенная оригинальная концепция по разработке единого геоинформационного центра лесного хозяйства, в котором основным компонентом представления пространственной информации о лесном фонде является геоинформационные модели лесных экосистем.

Практическая значимость работы.

1. Разработан научно-методологический аппарат в области построения геоинформационных моделей лесных экосистем, который может быть использован:

- государственными лесными ведомствами и учреждениями;
- частными компаниями в области аренды и управления землями лесного фонда;
- научными сотрудниками и исследователями в области лесных наук, исследователями в области геоинформатики, картографии;

2. Создана технология геоинформационного моделирования лесных экосистем на основе физического объекта исследования, конкретного лесного квартала, 196 квартала учебного опытного лесничества, филиала Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова, подтверждённая актом внедрения.

3. Разработаны и зарегистрированы базы данных трёхмерных моделей хвойных и лиственных лесообразующих пород на каждый класс возраста в условиях Северо-Запада России и программное обеспечение в виде интеллектуальной геоинформационной системы.

4. Предложенная технология геоинформационного моделирования лесных экосистем, может быть использована в стратегических задачах развития и анализа земель лесного фонда. Технология применима в смежных с лесным хозяйством областях: в природоохранных ведомствах, в интересах государственного управления территориями.

5. Разработаны научно-практические рекомендации по использованию геоинформационных моделей на базе предлагаемого единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством, где описана его инфраструктура, состав и технологии реализации центра.

Теоретическая значимость работы.

1. Разработан терминологический аппарат, новые понятия и идеи предоставления информации о структуре лесных экосистем на базе современных технологий и программно-аппаратного уровня.

2. Разработаны новые учебные курсы для подготовки кадров высшей квалификации уровня аспирантуры “Геоинформационное моделирование лесных экосистем” и уровня магистратуры “Геоинформационное моделирование территорий”.

3. Предложенные понятия и подход к анализу лесных экосистем подразумевают всестороннее технологическое развитие и совершенствование предлагаемого метода, в котором определен значительный потенциал в его применении для сферы лесного хозяйства.

Степень достоверности, апробация результатов исследований.

Достоверность результатов исследования подтверждается:

1. Практической реализацией технологии на базе разработанного программного обеспечения.

2. Регистрацией программного обеспечения, баз данных и способа технологии геоинформационного моделирования.

3. Изложенными и реализованными геоинформационными моделями лесных экосистем используемых в деятельности учебно-опытного лесничества.

4. Непротиворечивостью полученных результатов известным работам ученых и специалистов в предметной области; аналитическими выводами зависимостей, используемых в моделях и доказательством выдвинутых утверждений; корректным применением математических методов при проведении вычислений; геоинформационным моделированием для выбора варианта решений.

Апробация работы.

Основные результаты исследования докладывались на следующих научных конференциях:

1. Международная научная конференция. «Пространственные данные 2022». Секция 3. Геоинформатика, интеллектуальный анализ данных. Москва. 24.05.2022 Московский Государственный Университет Геодезии и Картографии. (МИИГАИК) Доклад: «Геоинформационное моделирование лесных экосистем».
2. Первая ежегодная международная научно-практическая конференция «Устойчивое и инновационное развитие лесопромышленного комплекса» RusForest 2022. Екатеринбург. 03.02.2022 Уральский государственный лесотехнический университет. (УГЛТУ) Доклад: «Геоинформационное моделирование лесной экосистемы: технология визуализации и функционирования модели».
3. III Всероссийская научно-техническая конференция-вебинар «Цифровые технологии в лесном секторе». Санкт-Петербург. 25.02.2022 Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова. (СПбГЛТУ) Доклад: «Интерактивное геомоделирование лесной экосистемы: от теории к практике».
4. Международная научно-практическая конференция «Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики». г. Пушкин. 25.05.2022 Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. (СПбГАУ) Доклад: «Геоинформационные модели лесов: инструмент перехода на новый уровень цифровизации лесного хозяйства».
5. XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика», пос. Нижний Архыз (Карачаево-Черкесская Республика). 27 сентября – 01 октября 2022 г., Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. (САО РАН) Доклад: «Интеллектуальное геомоделирование лесов».

6. Научно-практическая конференция «Интеграция лесной науки, практики и образования: проблемы и перспективы», Секция 3. Цифровая трансформация лесного комплекса и роль университетов в ее реализации. г. Йошкар-Ола. 06.10.2022 Поволжский государственный технологический университет. (ПГТУ). Доклад: «Технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем».
7. Научно-практическая конференция «ИНФОГЕО 2022», Секция Геоинформатика. Санкт-Петербург. 25.11.2022 Российский государственный гидрометеорологический университет. (РГГМУ). Доклад: «Технологическое обеспечение геоинформационного моделирования лесных экосистем».
8. Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки», Секция 5. Автоматизация, роботизация, информатизация управления машинами и системами лесного хозяйства и лесной промышленности. г. Казань. 24 апреля – 28 апреля 2023г., Казанский национальный исследовательский технологический университет. (КНИТУ). Доклад: «Геоинформационное моделирование лесных экосистем: инновационный способ представления данных о лесных экосистемах».
9. Конгресс проекта «Россия цифровая», по теме Цифровизация лесопромышленной отрасли, г. Петрозаводск 28.09.2023 Информационно-аналитический центр «Новые решения». Доклад: «Геоинформационное моделирование лесных экосистем: возможности и перспективы технологии».

По результатам исследования получено 2 свидетельства о государственной регистрации баз данных, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, зарегистрированных в исполнительном органе по охране объектов интеллектуальной собственности - Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС).

Результаты исследований были **внедрены**:

1. В образовательную деятельность направления подготовки 09.04.02 – Информационные системы и технологии, дисциплины уровня магистратуры «Геоинформационное моделирование территорий» и образовательную программу подготовки кадров высшей квалификации уровня аспирантуры «Геоинформационное моделирование территорий» по научной специальности 1.6.20 Геоинформатика, картография, подтверждены актом внедрения.

2. Геоинформационная модель 196 квартала используется в учебно-практической деятельности учебно-опытного лесничества филиала СПбГЛТУ имени С. М. Кирова, что подтверждено актом внедрения.

3. Внедрены в отчёт по НИР грант РФФИ № 22-26-20 120 «Газон как индикатор состояния устойчивой городской среды и адаптации к изменениям климата», подтверждены актом внедрения, по этапу Технологического применения сбора геопространственных данных средствами беспилотного летательного аппарата.

4. В выполненную НИР по теме «Разработка технологии инвентаризации лесов основанной на данных съёмки с беспилотного летательных аппаратов сверхвысокого пространственного разрешения с автоматизированной, интеллектуальной обработкой геоданных». Конкурса на предоставление в 2018 году субсидий молодым учёным Комитета по науке и высшей школы Правительства Санкт-Петербурга 2018 года, подтверждено дипломом Правительства Санкт-Петербурга.

Личный вклад автора. Все основные результаты, составляющие содержание диссертации, получены соискателем самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит ведущая роль при постановке задачи, разработке метода ее решения, проведении эксперимента по построению геоинформационных моделей лесных экосистем, проведение полевых работ по сбору геопространственной информации, обобщении и организации публикаций результатов исследований.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (323 источника, из которых 74 зарубежные).

Основной текст диссертации изложен на 282 страницах машинописного текста, включая 19 таблиц, 85 рисунков.

Соответствие паспорту научной специальности: Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.6.20 Геоинформатика, картография: 1, 2, 3, 7, 11, 12, 18, 19, 21.

Благодарности. Выражаю благодарность своим коллегам по кафедре Информационных систем и технологий, коллегам Института леса и природопользования за ценные консультации дискуссии и научную атмосферу работы. Отдельная благодарность научному консультанту профессору Истомину Е. П., а так же соавторам научных публикаций посвященных теме докторской диссертаций и студентов, принявших участие в научных исследованиях кафедры Информационных систем и технологий и Института леса и природопользования, Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова.

ГЛАВА 1.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ

Современный уровень программно-аппаратного обеспечения, технологий геоинформационного моделирования и увеличение производительности вычислительной мощности компьютеров, создают новую основу для разработки нового взаимодействия лица принимающего решения с программной средой для анализа геопространственной информации и разработки новых методов представления и визуализации оперируемой информации о лесных экосистемах. Создание новых технологий геопространственной визуализации сложных природных геосистем, изменяющихся во времени и находящихся в постоянной динамике, является последовательным развитием способов представления разнородной геоинформации в легко воспринимаемых человеком формах. Разработка новых интерактивных геоинформационных моделей лесных экосистем обладающих рядом новых качеств описываемых в данной работе является описанием комплексной методологии, раскрывающей потенциал данного направления в котором описываются взаимосвязи между отдельными моделируемыми объектами лесных экосистем и способом их представления в среде геоинформационного моделирования. Геоинформационное моделирование является фундаментальным методом познания окружающей среды, оно обеспечивает формализованное представление используемых данных и описание входящих связей в модель [279,280].

Восприятие и качественный анализ поступающей информации, лицом принимающим решения во многом зависит от способа представления самой информации, для упрощения основных процессов управления лесными ресурсами используют картографические материалы, электронные карты, данные дистанционного зондирования Земли. Во многих научных работах [34-38] описываются технологии визуализации пространственной информации, что является предметом для улучшения качества работы управления природными ресурсами. Задача любой модели - систематизированное представление

информации об объекте, наиболее полно отразить реальные свойства объекта моделирования. Особенностью создания геоинформационных моделей территорий является процедура цифровой трансформации реальных компонентов лесных экосистем. Начиная от крупных биологических объектов, например, древесные растения, заканчивая микро-компонентами, таких как: травянистые растения, мхи неорганические компоненты. Для повышения качества управления в природных геосистемах возможным становится разработка таких пространственных моделей, в составе которых содержатся следующие технологические решения:

- 1.Динамическая визуализация изменений пространственных характеристик отдельных объектов.

- 2.Подробные сведения об отдельных объектах компонентов моделирования и отражения их параметрических свойств.

- 3.Представление развития прогнозируемых сценариев на основе данных интегрированных в состав модели.

- 4.Возможность проведения ситуационных экспериментов на основе разработки карты поведений киберфизических систем [39].

При рассмотрении леса как управляемого ресурса необходимо учитывать уровень качества государственного управления лесами. Для качественного управления лесными ресурсами на уровне рассматриваемого субъекта управления необходимо составление современных высокоточных, информативных, динамически меняющихся интерактивных региональных карт лесничеств в виде их цифровых моделей, что реализуемо при помощи описанных выше технологий. Современные геоинформационные технологии позволяют проводить интеграцию разнородных данных, включающих в себя геоинформационные модели развития лесопользования по заданным параметрам в качестве оперативного источника, показывающего детализированное описание происходящих процессов в территориальных органах управления лесами – лесничествах [40,41].

1.1. Отечественный и мировой опыт применения геоинформационных технологий для управления лесным хозяйством

С развитием общего уровня компьютерных технологий их всеобщим внедрением в сферы хозяйственной деятельности, растёт эффективность их применимости в управлении природными ресурсами. Детальный анализ территорий на основе систематизированного представления разнородной информации о природных объектах, которые являются стратегически важными экосистемными ресурсами стран, обеспечение сохранности которых их систематизированный, периодический мониторинг, позволит обеспечить процессы управления территорией наиболее рационально. Базы пространственных данных, визуализация сопровождающей информации о геобъектах моделируемой территории, представляемая в информационной среде взаимодействия с человеком позволяют проводить оценку территорий наиболее комплексно, свод полученной разнородной информации позволяет проводить оценку местности наиболее объективно, сводя к минимуму условия неопределенности и неполноты сведений о входящих объектах. Принятие управленческих решений во многом зависит от способа восприятия информации, её полноты и достоверности.

Вне зависимости от страны обладающей лесными ресурсами, общими целями эффективного лесного хозяйства является:

- приведение в известность и поддержание баз данных о лесах в актуальном состоянии;
- обеспечение органов управления лесным хозяйством информацией о состоянии и динамике лесных ресурсов для удовлетворения потребностей, общества, лесной промышленности, других отраслей и страны в целом;
- своевременное получение данных количественного и качественного состава лесов для актуализации информации на основе о лесах принятой нормативно-правовой документации: лесных регламентов, лесных планов, проектов освоения лесов;

- обеспечение и информационная поддержка многоцелевого использования лесных ресурсов на арендованных участках лесного фонда;
- разработка и совершенствование технических приемов и методов изучения лесных ресурсов для проведения научно-исследовательских работ в лесном хозяйстве.

Отечественный опыт применения геоинформационных технологий в лесном хозяйстве. В качестве методов управления лесными ресурсами, необходимо абстрактное представление информации о лесах лицу принимающему решение. В классических способах отображения лесов, как правило, выступают картографические материалы, и лесные тематические карты [55,56]. Такой способ представления данных удобен тем, что он позволяет систематизировать большие данные и представить их географически. Основоположник Российского лесоводства Г.Ф. Морозов характеризовал лес именно как географическое понятие. Именно такое свойство, определяющее лес как пространственный объект, изменяющийся во времени, позволяет подойти к необходимости моделирования его жизненного цикла на основе технологий геоинформационного моделирования [57]. К одной из передовых геоинформационных технологий относят технологии геоинформационного моделирования. Геоинформационное моделирование является фундаментальным методом познания, который содержит в себе несколько взаимосвязанных уровней описания и построения информационных моделей, включающих модели геопространства, геообъектов и геопроцессов [288,318,319].

Если посмотреть на карту России со спутниковой основой (рис.1), можно сделать вывод, что наша страна, лесная страна, более 50 % её площади покрывают леса, это обуславливает особое значение лесов как для страны в целом, так и для народного хозяйства, для экологии и влияния лесных экосистем России на климат всей планеты. Обеспеченность данным ресурсом накладывает необходимость бережного и аккуратного отношения к лесным экосистемам, к построению

современных методов ведения лесного хозяйства с учётом передовых, геоинформационных технологий.



Рис. 1. Спутникова карта России 2021 года

Развитие геоинформационных технологий в России шло в соответствии с развитием нескольких направлений, здесь повлияло развитие несколько отраслей: спутниковые технологии, развитие вычислительной техники, развитие инфокоммуникационных систем, развитие средств беспилотной авиации, развитие оптических технологий. Данный перечень не окончателен, поскольку на отдельные составляющие играли роль отдельные технологии, практически во всех областях, где существовала необходимость оперирования пространственной информацией. На формирование методов обработки геоинформации влияли программные продукты, которые были разработаны в соответствующие периоды времени коммерческими компаниями, часть из которых используется и в современное время.

Существенный толчок в применении геоинформационных систем произошёл после 1995 года, когда некоторые отраслевые системы стали использоваться в деятельности отдельных ведомств. Одновременно в это и последующее время на рынок вычислительной техники стали поставляться

персональные компьютеры, которые сыграли роль широкого распространения использования геоинформационных систем большого круга пользователей. Активное развитие процессорной техники и увеличение мощности графических дискретных чипов с 2004 годов, объёмом памяти более 512 мегабайт, позволило оперировать не только стандартными двумерными картами, но и позволило формировать представление информации в наиболее естественном способе её отображения в виде трёхмерных моделей. Фундаментальные основы такого способа представления информации были заложены намного ранее, с конца 1980-ых годов, при этом, данные технологии не использовались в деятельности лесного хозяйства на официальном уровне. Наиболее широкое распространение данные технологии получили в медиаиндустрии и кинематографе. Такие технологии позволили в их совместном сочетании создавать новые виды геопространственного представления информации – геоинформационных моделей территорий и геоинформационных моделей объектов. Такие модели позволили формировать отображение в компьютерной среде естественных процессов происходящих на Земле [320-322].

Если анализировать опыт зарубежных стран в применении современных информационных технологий в области ведения лесного хозяйства, стоит обратить внимание на опыт тех стран, где учтены две важные составляющие.

Первая это большая площадь покрытой лесом земли, именно большое количество ресурса обуславливает необходимость в поиске новых технологий способных обеспечить эффективный процесс управления лесным ресурсом.

Вторая это уровень обеспечения отрасли современными методами ведения лесного хозяйства, он напрямую зависит от экономических, технологических, социальных и юридических факторов. В некоторых странах складывается ситуация где существует обеспеченность лесными ресурсами, но отсутствует должный контроль в его рациональном использовании и непрерывном мониторинге.

Мировой опыт применения геоинформационных технологий в лесном хозяйстве. В странах интенсивного ведения лесного хозяйства (Канада, США,

Финляндия, Россия) эффективно используется сочетание геоинформационных технологий и технологий компьютерного моделирования [42-46]. Наиболее часто используемыми источниками получения информации является применение технологий лазерного сканирования. Применение данной технологии получило активное развитие и всестороннее применение среди зарубежных [47-49] и отечественных учёных, а также компаний использующих данное оборудование на практике [50-54].

На основе данных двух подходов, в работе определён перечень для анализа технологий стран, опыт которых позволит проанализировать и выявить ключевые применяемые геоинформационные технологии и определить их положительные и отрицательные качества.

Среди зарубежных стран интенсивно ведущие лесное хозяйство в работе определены:

- Канада - 38,7 % от общей площади страны и 3 469 281 км² покрытой лесом земли.
- Финляндия - 73,7 % от общей площади страны и 224 090 км² покрытой лесом земли.
- Австралия, 17,4 % от общей площади страны и 1 340 051 км² покрытой лесом земли.
- Япония - 68,4 % от общей площади страны и 249 350 км² покрытой лесом земли.
- Бразилия - 59,4 % от общей площади страны и 4 966 196 км² покрытой лесом земли.
- Камерун - 43,0 % от общей площади страны и 203 404 км² покрытой лесом земли.

Таким образом, охват стран по их географическому разнообразию соблюден, учитывается и принцип высокого уровня лесистости территории страны, каждая из стран находится в разных частях света, имеет свои социально-экономические особенности, в качестве критериев анализа необходимо учитывать:

- 1.Уровень технологического обеспечения в отрасли.
- 2.Устройства, применяемые для сбора информации о лесе.
- 3.Современные научные методы анализа информации о лесе.
- 4.Современные информационные решения в части управления лесами.
- 5.Геоинформационные технологии, используемые в лесном хозяйстве
- 6.Инновационные информационные решения в области управления лесами.

Среди ключевых технологий во внимание будут приниматься следующие особенности:

- технологический способ сбора информации о лесах;
- технологии анализа и обработки информации о лесах;
- фактическое применение технологии в государственных интересах;
- фактическое применение технологии в частных интересах;
- технологические различия и особенности технологий.

Канада - страна со схожими климатическими характеристиками к России и большой лесопокрытой площадью. Лесистость Канады составляет 3,1 млн. кв. км территорий, что составляет 33,6 % площади от всей территории страны (рис. 2). Среди технологий геопространственного анализа, базирующихся на современных геоинформационных технологиях можно отметить подходы по сканированию леса при помощи высокоточных устройств [58,59].

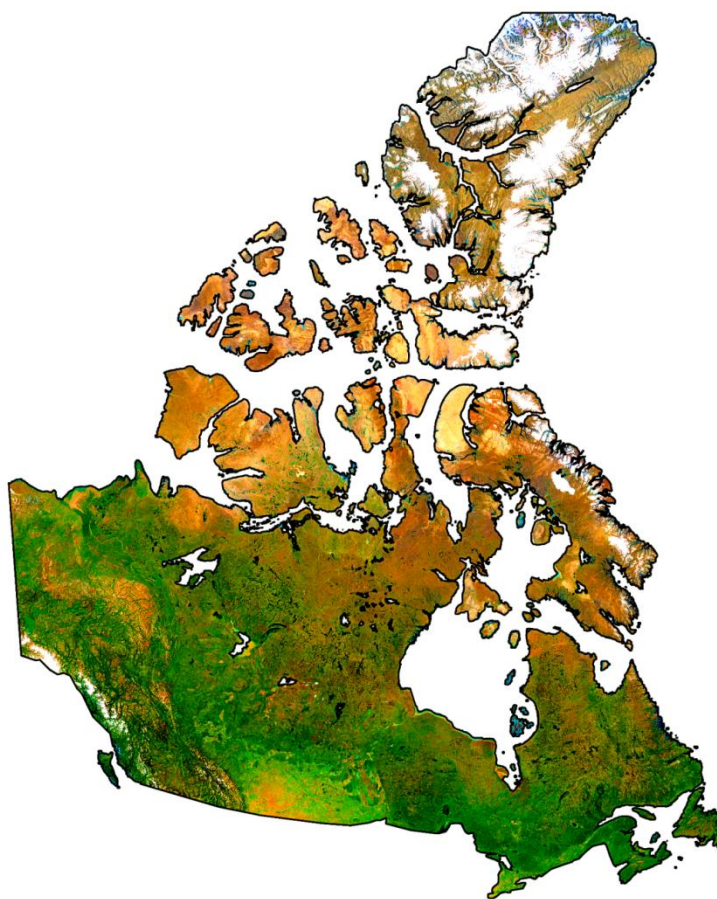


Рис. 2. Покрытая лесом территория Канады

Основные технологические особенности проведения анализа земель лесного фонда Канады, схожи с Российскими особенностями: большая удалённость территорий, обширные площади покрытые лесом определяют особенности использования данных дистанционного зондирования для анализа характеристик лесов. Одним из крупных направлений с геопространственными данными является получение таксационных показателей насаждений. Авторами в научных работах [60,61] произведено успешное сочетание методов комплексирования спутниковых данных, панхроматических изображений с высоким пространственным разрешением снимков и данных, полученных при помощи выборочного сканирования. Перспективность сочетания двух типов данных с разными спектральными характеристиками позволяет получить дополнительные анализируемые данные, что важно при выработке управляющих решений. При этом, стоит отметить, что различные типы получаемых геоданных требуют различного программного подхода в их обработке.

Ещё одно направление формирования геопространственных данных в части государственного управления лесами Канады, это применение технологий лидаров для государственной или национальной инвентаризации лесов. Лазерного сканирования окружающего пространства при помощи импульсов частиц света с регистрацией отраженных сигналов, в виде облака точек в программной среде [62,63]. Данный метод был широко апробирован в штате Онтарио, [64] основной задачей исследования являлось внедрение предлагаемой технологии в деятельность государственных и лесопромышленных организаций связанных с ведением лесного хозяйства. За период использования технологий Лидара с 2005 года выработаны различные подходы к процедуре обработки полученных данных анализа лесной растительности в интересах количественной оценки лесов. Одним из основных элементов сбора информации - использование конкретной модели Лидара установленного на самолёт или беспилотный летательный аппарат. Методики сбора информации посредством лидара в научных работах различаются [64,65], в части научных работ, предлагаются оригинальные методы по коррекции систематических ошибок в оценках полученных данных на базе описываемой технологии [66], что говорит о технологическом несовершенстве метода и отсутствием общепринятой методики работы с новым форматом данных в интересах лесного хозяйства.

Третье крупное направление исследований учёных Канады связанное с обработкой геопространственных данных лесных массивов, это оценка крупных геоэкологических показателей, таких как оценка эмиссии углерода или оценка биомассы растительности [67,68]. Данные исследования обработки информации, как правило, сосредоточены на базе обработки данных полученных со спутниковых данных (Sentinel-2.1a, Sentinel-2.1b, Landsat-7, Landsat-8).

Еще одна категория исследований ученых Канады, наиболее сложная с технической точки зрения, это процесс разработки долгосрочных компьютерных моделей лесных экосистем. Основная задача данного типа исследования связана с долгосрочной оценкой и прогнозированием динамики лесных экосистем в период климатических и антропогенных изменений [69,70].

Определенное развитие получило применение машинного обучения для обработки и интерпретации полученных геопространственных данных при помощи технологии Лидара [71]. Данная технология значительно ускоряет процесс обработки и классификации данных. Перспективность данного метода на современном этапе находится на стадии формирования различных подходов и выработке наиболее лучших методик использования технологий лазерного сканирования и машинного обучения. О чём свидетельствуют исследования связанные с обработкой геопространственных данных больших территориальных образований, таких как северные бореальные леса Канады [72].

Обобщая различные подходы и технологии обработки геопространственной информации исследователей Канады, можно сделать вывод о высоком уровне развития применения геоинформационных технологий и методов сконцентрированных на технологии лазерного сканирования и обработке данных дистанционного зондирования Земли. Технологии трёхмерной визуализации лесов с сочетанием обработки таксационной информации и геоинформационным моделированием развиты в меньшей степени. На данном этапе различные исследователи из разных институтов формируют наиболее различные методы работы с полученными данными от технологий лазерного сканирования Земли.

Финляндия - государство, интенсивно использующее лесные ресурсы и передовые технологии в управлении лесами, её большая часть территории покрыта лесами (рис. 3).



Рис. 3. Покрытая лесом территория Финляндии

В стране развиты и активно внедряются инновационные методы ведения лесного хозяйства в целях национальной системы инвентаризации лесов [73,74]. Широкое применение нашёл способ стратификации лесов [75], где основным элементом анализа собираемых данных является разделённая на страты территория, в которой происходит периодический сбор данных о лесах. Так же, в работах ряда исследователей и финских лесоустроительных компаний, одним из видов деятельности которых является сбор информации о лесе, сосредоточены методы по обработке применений технологий лазерного сканирования, аналогичные подходам исследователей из Канады [76-79].

Однако, крупных научных работ по трёхмерному моделированию лесов с элементами геоинформационного моделирования при анализе научной литературы Финляндии не выявлено, что говорит о не разработанности данного

направления. Локально встречаются работы, в основном частично использующие 3-d моделирование, но в интересах визуализации данных полученных с бортового сканера для нужд городского озеленения [80]. Обосновывается это тем, что масштаб проектирования трёхмерных моделей локальных территорий моделирования намного меньше лесных, что объективно удобно для процесса проектирования отдельных 3-d моделей, входящий в среду моделирования и для минимизации нагрузки на вычислительный процесс при отображении многомерной информации.

Австралия - государство не только обладающее большими и разнообразными лесными ресурсами, но и децентрализованной формой управления лесами. Различные формы управления территорией определяют различные технологии для их эффективного мониторинга. Общая лесная площадь Австралии составляет 137,7 млн. га, порядка 18 % от общей площади страны. Австралия занимает 6 место по площади, покрытой лесом в мире (рис. 4).



Рис. 4. Покрытая лесом территория Австралия

Новые способы применения геоинформационных технологий и различных подходов по получению геопространственной информации необходимы в виду ряда причин, в частности, необходимости прогнозирования и мониторинга пространственного распространения, лесных пожаров, которые нанесли серьёзный вред лесным экосистемам Австралии и фауне в 2019-ом, 2020 и 2021 году [81,82]. В ряде научных работ, для оценки последствий лесных пожаров используются беспилотные летательные аппараты и в целях текущего мониторинга, получения оперативной геоинформации, построения пространственно-временных моделей, распространения лесных пожаров [83-85]. В процессе мониторинга территорий Южной Австралии успешно применяются технологии мобильных геоинформационных систем [86].

В задачах инвентаризации лесов Австралии и периодического обновления данных о лесах требуются особый мониторинг ценных древесных пород растений, таких как Эвкалипт (*Eucalyptus*), Сосна лучистая (*Pinus radiata*). Для обработки периодических данных используются как данные полученные при помощи лазерного сканирования лидар, так и данные полученные на базе спутниковой съёмки при помощи аппарата Landsat 5 [87,88].

В процессе анализа научной литературы выявлены научные работы направленные на применение технологий трёхмерного моделирования и интеграцией с геопространственными моделями, связанные с наполнением информации с физическими свойствами цифровых моделей, что может быть отнесено к процессу геоинформационного моделирования территорий [88]. Так же, при картировании лесных пожаров используются методы обработки данных дистанционного зондирования Земли на базе методов машинного обучения [89].

Общий уровень применения геоинформационных технологий в Австралии достаточно высокий он изобилует разными подходами для обработки, фиксации и накопления систематизированного свода геопространственной информации. Здесь применяются подходы, связанные с прогнозированием, динамикой лесных экосистем, можно отметить, так же, что в практике лесного хозяйства Австралии существует плантационное лесовыращивание, поскольку возраст спелости

древостоев достигается уже в возрасте 15-25 лет, а это требует периодического мониторинга растительности на основе геоинформационных технологий. Однако, технологии геоинформационного моделирования в стране находятся только на этапе пробных исследований и локальных моделей.

Япония - высокий уровень технологического развития страны, густонаселённость и большая площадь покрытой лесом территории 68,4 % от общей территории страны (рис. 05) предопределяет интенсивное потребление лесных ресурсов населением.



Рис. 5. Покрытая лесом территория Японии

Способы применения последних геоинформационных технологий в отрасли лесного хозяйства основаны в основном на определении характеристик и параметров конкретных древесных видов растений. К примеру, в научной работе [90] рассматривается оценка высоты и диаметра дерева на высоте груди (DBH) по цифровым моделям поверхности и ортофотоснимкам, полученным с помощью

беспилотной воздушной системы для леса Японского Кипариса (*Chamaecyparis obtusa*).

Отмечаются работы, связанные с моделированием структурного развития лесонасаждений с адресной диагностикой системы лесоправления, исследователей из научно-исследовательского института лесного хозяйства и лесных товаров [91]. Также, стоит отметить, работы, в которых определение характеристик высоты деревьев при помощи лидара направлены на исследование морфометрических характеристик рельефа и изучения отдельных типов ландшафта [92].

Некоторые учёные [93] используют технологии беспилотных летательных аппаратов для построения 3-D модели участка леса, на базе полученных серий фотоизображений. Данное исследование интересно тем, что на основе сформированной методики, построена территориальная модель на определённый участок, однако модель представляет собой единый объект без разделения на конкретные породы.

В целом, подходы, используемые в практике применения геоинформационных технологий Японии к лесному хозяйству, критически не отличаются от ГИС-технологий других стран.

Бразилия - государство, обладающее самыми большими по запасу древесными ресурсами и наиболее важными для планеты тропическими, экваториальными лесами. Общая площадь покрытой лесом земли от площади страны составляет 59,4 % (рис. 6).



Рис. 6. Покрытая лесом территория Бразилии

Основные геоинформационные технологии, используемые в деятельности лесного хозяйства Бразилии, связаны с необходимостью определения площадей повреждёний растительности вследствие лесных пожаров, а так же в необходимости определения и точной идентификации породного состава древостоев по кронам деревьев [94,95].

Особенность лесов Бразилии большая площадь покрыта тропическими лесами и мангровыми лесами, данные типы лесных экосистем связаны с другими экологическими системами, например, речными системами, их анализ так же требует применения современных технологий геоинформационных систем и картографирования. Обработка текущей информации таких взаимосвязанных систем обусловлено периодической повторяемостью наводнений и необходимостью анализа рисков их появления на основе обработки геопространственной информации. Для решения данных задач используются, и

применяются программные системы с открытым исходным кодом, некоторые труды по данной тематике представлены в работах [96,97].

Картирование растительности, видового разнообразия древесных, кустарниковых пород и разделения на определенные категории лесных земель, хозяйственно значимые зоны, так же является одной из приоритетных задач лесного хозяйства Бразилии, этому вопросу посвящены научные работы [98,99]. В данном контексте работы так же связаны с необходимостью мониторинга и прогнозирования стихийных бедствий, преимущественно геологического и гидрологического характера, так же необходим мониторинг почвенного покрова и анализа лесовосстановления леса после лесных пожаров. Здесь используются как геопространственные данные, например полученные при помощи миссии шаттла данные SRTM, а так же специализированные геоинформационные системы [98,99].

Стоит отметить, что большая площадь покрытой лесом территории Бразилии требует обработки большого объема информации, в данном случае спутниковая съёмка и методологические подходы по обработке спутниковых материалов являются одной из разрабатываемых тематик на протяжении более 30 лет, что представлено в работах [100,101]. Отдельные работы посвящены классификации сети лесных дорог в задачах связанных с транспортировкой изъятой древесины и оптимизацией маршрутов вывоза лесных ресурсов [102].

Камерун – лесное государство, большая часть которого покрта лесом (рис. 7). Экономическое развитие, которого наиболее развито в тропической зоне Африки, активно использующее современные геоинформационные технологии связанные с необходимостью решения проблем опустынивания земель, мониторингом значительных объемов незаконной заготовки древесины и с фактами незаконной рубки леса [281].



Рис. 7. Покрытая лесом территория Камеруна

В части научных работ, посвященных анализу древесной растительности при помощи специализированных геоинформационных систем (Saga GIS, ArcGIS, ENVI), на базе обработки полученных фотоизображений со спутников Landsat, Sentinel 2.1a и 2.1b отмечаются следующие научные работы [103-105]. В основном, в данных работах раскрываются способы и подходы к обработке дистанционных материалов, извлечения из них полезной информации для интерпретации данных и прогнозирования динамики лесных экосистем что не отличает научные методические подходы данного направления от других рассмотренных стран.

В некоторых работах [106] применяется обработка информации о тропических лесных экосистемах на основе оценки разработанных пространственных индексов. Исследователями отмечается, о связи между нарушением водного режима в лесных экосистемах при бесконтрольном лесопользовании, превышения объемов рубок, что влекло за собой наводнения в близлежащих регионах не только Камеруна, но и граничащих странах, бассейна

реки Конго [107,108]. Так же можно выделить работы связанные с моделированием роста определённых видов древесных растений [109], где топографические и гидрологические особенности оценивались с помощью геоинформационной системы SAGA-GIS (Система автоматизированного геолого-геофизического анализа).

В целом научная литература и тактико-технологические подходы применения геоинформационных технологий Республике Камерун разнообразны, целевые исследования исходят из потребностей общества и необходимости картографирования определённых видов ландшафтов. Существуют работы направленные на интеграции методов ГИС и социальных наук, раскрытия связей взаимоотношений человека и природы, что особенно подчеркивается в рамках компактного проживания коренного населения в тропических лесах Камеруна, лес для которых является средой обитания и основным ресурсом для жизни [110,111].

Обобщая проведенный анализ в области применения геоинформационных технологий в области лесного хозяйства выбранных стран можно сделать следующие выводы.

- 1.Достаточно сложно выделить конкретную страну обозначив её как лидера применения ГИС-технологий, в каждой из рассмотренных стран были оригинальные научные подходы в соответствии с обозначенными исследованиями авторов.
- 2.Можно отметить, что в северных странах (Канада, Финляндия) исследования больше сосредоточены на разработке методов национальной инвентаризации лесов, здесь больше научных работ посвящено применению и исследования возможностям работы с обработкой информации на базе устройства лидар.
- 3.Не выявлено технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем, как серьезного научно-практического и разработанного метода ни в одной из рассмотренных стран. Фактически отсутствует терминологический аппарат и полноценные трёхмерные модели древесных пород с параметрическими характеристиками, где за основу взят объект моделирования - отдельное дерево.

4. Различные категории геоинформационных технологий рассмотренных стран можно выделить в качестве некоторых рассматриваемых критериев и объединить в виде таблицы, как результат анализа и включив в перечень Россию.

5. В каждой из стран на практике применяется специфическое геоинформационное обеспечение как коммерческое, так и с открытым исходным кодом, среди геоинформационных систем можно выделить: (ArcGIS, QGIS, ZuluGIS, MapInfo, AutoCad Map, SAGA-GIS, NextGIS, ГИС Integro, Agisoft Phothoscan, Google Earth Pro).

Для представления особенностей наиболее распространённых технологий в деятельности исследованных стран выделим четыре категории использования технологий, после чего совместим данные в виде таблицы (табл.1):

1. Технология применяется – стабильное, отработанное использование разных подходов технологии и обширные научные исследования апробации технологического подхода, высокий уровень достоверности и надёжности.
2. Технология развита в начальной стадии – существуют отдельные, частные примеры работы технологии без широкого внедрения и апробирования, в основном характеризуется наличием ограниченного применения и малого количества научных работ в данной области применения технологического подхода.
3. Технология применяется в средней степени – технология используется в разных ситуационных решениях, однако отсутствует её повсеместное и стабильное использование, существуют технические сложности или ограничения применения. Технологический подход характеризуется различными методами применения одной технологии.
4. Технология активно развита и применяется – технология используется в широкомасштабном способе применения, внедрена в деятельность государственных органов лесного хозяйства, достоверна.

Таблица 1 Геоинформационные технологии разных стран

Страна	Геоинформационная технология			
	Спутникова я обработка снимков	Применение технологии Лидар	Использование БЛА	Цифровые модели
Россия	применяется в средней степени	применяется в средней степени	применяется в средней степени	развито в начальной стадии
Канада	технология применяется	активно развита и применяется	развито в средней степени	развито в начальной стадии
Финляндия	технология применяется	активно развита и применяется	активно развита и применяется	развито в средней степени
Австралия	применяется в средней степени	применяется в средней степени	применяется в средней степени	развито в начальной стадии
Япония	применяется в средней степени	активно развита и применяется	активно развита и применяется	развито в начальной стадии
Бразилия	применяется в средней степени	активно развита и применяется	применяется в средней степени	развито в начальной стадии
Камерун	технология применяется	применяется в средней степени	применяется в средней степени	развито в начальной стадии

Анализируя данные таблицы можно сделать вывод, что наибольшее количество активного применения геоинформационных технологий сосредоточено в Финляндии и Японии. Технологии цифровых моделей преимущественно развиты только на начальной стадии, связано это с тем, что низкая производительность вычислительных средств, ранее не позволяла оперировать большим объёмом данных, которые используются при построении геопространственных трёхмерных моделей на крупную географическую территорию.

На внедрение геоинформационных технологий в отрасль влияет не только процесс разработки самой технологии, здесь особое влияние оказывает

структура и грамотное ведение самого лесного хозяйства, которое определяется лесным законодательством. Лесное законодательство регулирует как техническое обеспечение, так и процесс возможности применения и использования различных технологий, в том числе и геоинформационных технологий.

1.2. Управление лесным хозяйством на базе геоинформационного моделирования лесным экосистем

Цели управления – явно и неявно выраженные предпочтения субъекта управления и других заинтересованных лиц. Решение проблемы целеполагания требует соблюдения определенного порядка действий, последовательности взаимосвязанных процедур, направленных на формирование системы целевых установок [282]. В данной работе, лес рассматривается не только с позиции объекта хозяйственного ресурса потребляемого человеком, но также как многоаспектный экосистемный компонент разных живых сообществ, как биологическая среда. Поэтому, в данной работе, для измерения различных свойств леса их описание достигается за счёт формирования набора моделей, наиболее приближенных к их естественному виду, такой способ отражения информации формирует наиболее комплексное отражение природно-технических параметров элементов измеряемой геоинформационной модели. Для описания процессов связанных с управляющим воздействием на лесную экосистему необходимо представить, какое место занимает модель между объектом управления, технологией управления и лицом принимающим решение (рис. 8).

Особенность геоинформационного моделирования состоит в том, что на основе формирования представления данных в удобном для восприятия информации, в виде геоинформационной модели, сформированные решения позволяют реализовать управляющее воздействие на лесные экосистемы. Поскольку лесная среда подлежит различным методам воздействия и формирования древостоев в интересах хозяйственной деятельности [283,284].

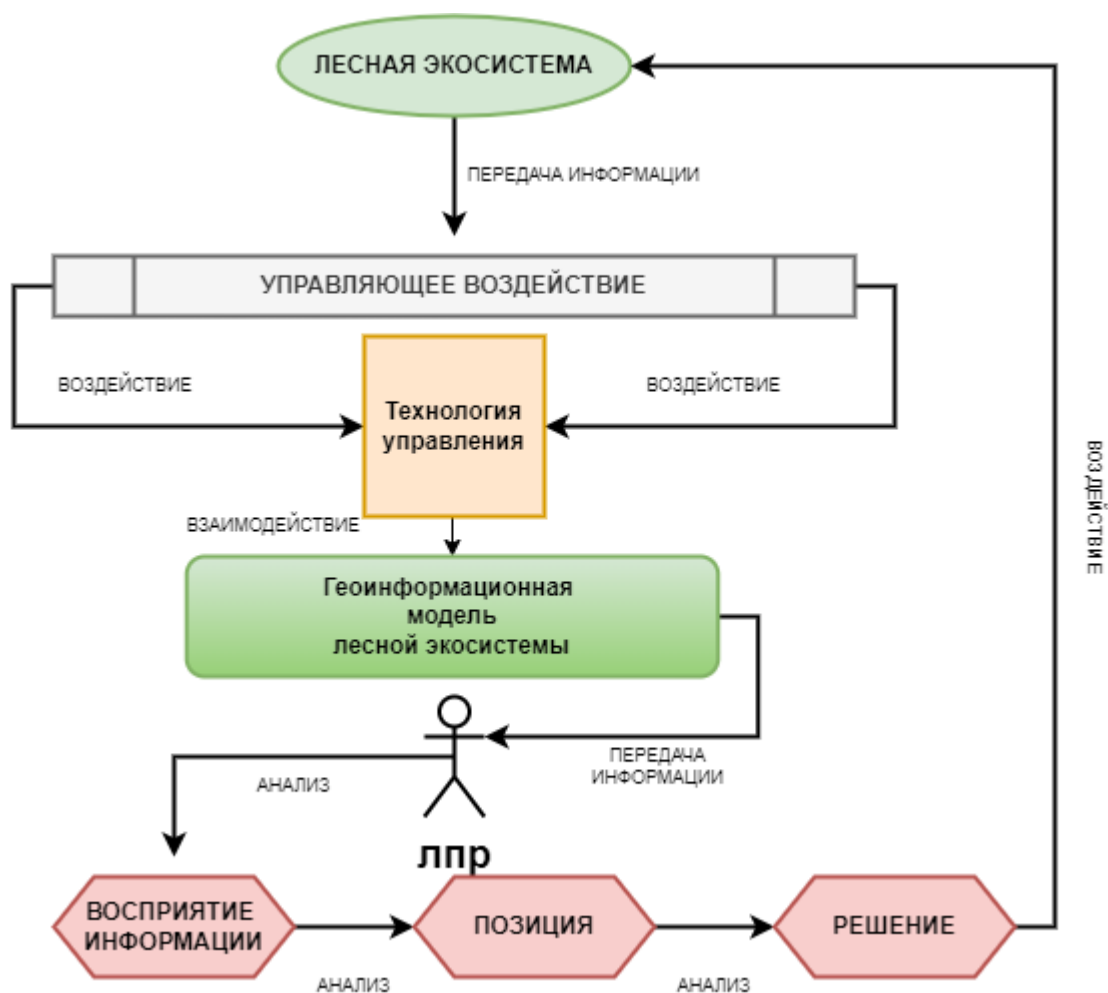


Рис. 8. Представление основных компонентов управления средствами модели.

В состав системы геомоделирования входят общие и частные геоинформационные методы обработки геопространственной информации, а также формальные представления пространств, геоструктур и категорий управления.

С начала появления систематизированного свода информации о лесах накоплен значительный объем информации о лесе, выражен он в виде лесоустроительной и таксационной информации [112]. По своей структуре таксационная информация - это база данных, составленная на основе полученной информации от фиксации измеряемых параметров лесной среды, при помощи полевых и дистанционных методов сбора данных о лесном участке используя таксационные и вспомогательные приборы. Периодическое лесоустройство и проведение таксации насаждений на одном и том участке в пределах одного

участка леса, на котором отсутствует проведение рубок, позволяет следить за динамикой изменений в лесах [113,114].

Более глубокое исследование таксационных данных, их показателей и связей с другими компонентами, на основе технологий интеллектуального анализа данных способно раскрыть многие закономерности протекающих процессов в лесных экосистемах [114,115]. Поэтому в качестве дополнительного компонента геоинформационного управления территорией необходимы как инструменты обработки собираемых данных, так и способы визуализации полученной информации о лесе. Полученная информация о лесе, это геопространственная информация, поскольку она характеризует определённую среду в пространственно-временном аспекте.

На сегодняшний день при использовании ГИС-технологий уже недостаточным является представление информации только в виде табличных элементов или двумерных карт. Технологии машинного обучения предполагают, такой способ представления информации лицу, принимающему решения, при котором он видит динамику свойств рассматриваемого ресурса и возможные сценарные события, развитие изменения модели и поведение объектов, это позволяет обеспечить поддержку в системе принятия решений на качественно ином уровне восприятия информации. В связи с этим, важным компонентом новых технологий управления лесными землями, являются инструменты представления полученной геопространственной информации о лесе в удобном для восприятия виде. В виде геоинформационных моделей, которые разрабатываются средствами геоинформационных систем, программными средами и системами компьютерного моделирования.

Инструмент представления таксационной информации в цифровой среде в классическом способе её отображении - это база данных подключенная к геоинформационной системе, связанная с картографическими материалами. Так же, стоит отметить, что в классических геоинформационных системах, требуется постоянное переключение между базой данных и отображением картографических материалов, что не удобно для постоянного анализа

воспринимаемой информации. При этом, также стоит отметить, что на лесных картографических материалах, невозможно достоверно указать какое конкретное количество деревьев располагается на таксационном выделе, что содержит в себе логическую проблему истинного отображения реального количества деревьев и их состава. Однако развивая представления данных о лесе с использованием технологий геоинформационного моделирования, следует сделать предположение о возможности в качестве альтернативного способа управления лесными землями на основе её геопространственной модели, представленная информация в таком способе визуализации и структура данных будет наиболее точно соответствовать её физическому реальному отображению и точному составу лесных экосистемах.

Полученную таким способом информацию, возможно, интегрировать в состав интерактивных геоинформационных моделей леса. Определим понятие геоинформационная модель леса - это смоделированная модель реального участка земли покрытой лесной растительностью, в которой содержатся предметно-истинные свойства моделируемых объектов, отдельных компонентов лесной экосистемы. Под интерактивным отображением геоинформационной модели понимается её возможность отображать, соответствовать и удобно представлять информацию при работе с ней.

Понятие интерактивности модели, в исследовании научной литературы не выявлено и нет четко сформулированного этого понятия интерактивности, в зависимости от сферы применения трактовка термина интерактивность различная.

В диссертационной работе будет использовано следующее понятие интерактивности: как свойство моделируемого объекта, раскрывающие и наглядно демонстрирующие различные функции геоинформационных моделей в легко воспринимаемой лицом принимающим решения виде и раскрывающее характер взаимодействия связей между моделируемыми компонентами.

Интерактивность так же выражается в определении степени взаимодействия модели с лицом принимающим решения. В работе [117] определяется шкала интерактивности интерфейсов геоинформационных систем. Аналогичным

образом требуется построение шкалы интерактивности геоинформационных моделей в зависимости от масштаба, сложности и структуры модели.

Геоинформационные модели лесных экосистем в своей структуре могут иметь разный масштаб представления необходимых сведений, основанных на технологии сбора информации. На государственном уровне управления лесами разработка таких моделей возможна на уровне декомпозиции отдельно рассматриваемого участкового лесничества, лесного квартала, таксационного выдела, обусловлено это тем, что существуют ограничения на размещение вычислительных мощностей и оснащение техническим обеспечением лесничеств. Для использования конкретной модели возможно применение локальной геоинформационной системы, включающей в себя цифровую модель отдельного лесничества, в основе которой содержится отображение пространственно-временных изменений леса, такие методы анализа информации способны повысить качество управления лесными ресурсами.

Геоинформационное моделирование лесов включает в себя, не только непосредственное использование ряда геоинформационных технологий как основного инструмента моделирования, но и разработку интерактивных 3-D моделей лесных экосистем, которое реализуемо средствами следующих технологических решений, в сочетании и взаимодополнении:

1. 3-D моделирование отдельных объектов;
2. Применение технологий искусственного интеллекта для упрощения анализа геопространственной информации;
3. Применение нейросетевых технологий для упрощения процесса построения геоинформационной модели;
4. Использование данных дистанционного зондирования Земли;
5. Обработка больших объёмов информации Big-Data средствами машинного обучения.

Введем понятие интерактивная геоинформационная модель леса. Интерактивная геоинформационная модель леса – это многофункциональная, геоинформационная, трёхмерная модель лесной экосистемы, в основе которой

заложены реальные данные геопространственного расположения лесов, породного состава, таксационные характеристики древостоев, математические закономерности процессов роста древостоев, биометрические данные отражающие реальные свойства моделируемого участка леса. Свойство интерактивности в модели определяется её механикой и точной настройкой отображения отдельных компонентов, способностью к мульти масштабированию и визуализации параметров характеризующих процессы в интересах лица принимающего решения. Задача интерактивного отображения леса, состоит в формировании такого способа восприятия информации, при котором достигается эффект понятности отображения моделируемой информации для целей управления лесами и последующих решений.

Сопровождение лица, принимающего решения использующего интерактивную геоинформационную модель призвано обеспечить:

1. Адекватную визуализацию моделируемых пространственных данных.
2. Уточнение картографических данных.
3. Уточнение пространственной структуры леса.
4. Уточнение качественного состава лесов.
5. Уточнение и визуализацию хозяйственной деятельности в лесах человека.
6. Упрощение работы с многомерными данными.
7. Улучшение качества управления смоделированным объектом.

Инструментом отображения, результатов обработки данных в геоинформационных система, как правило, представляется на цифровых картах. Особенность применения геоинформационных систем для визуализации лесных тематических данных состоит в том, что все материалы пространственно-временной информации интегрируются в состав ГИС [118]. В диссертационной работе предлагается подход, основанный на разработке геоинформационных моделей с учётом территории исследования, в среде локальной геоинформационной системы, структура которой представлена на (рис. 9).

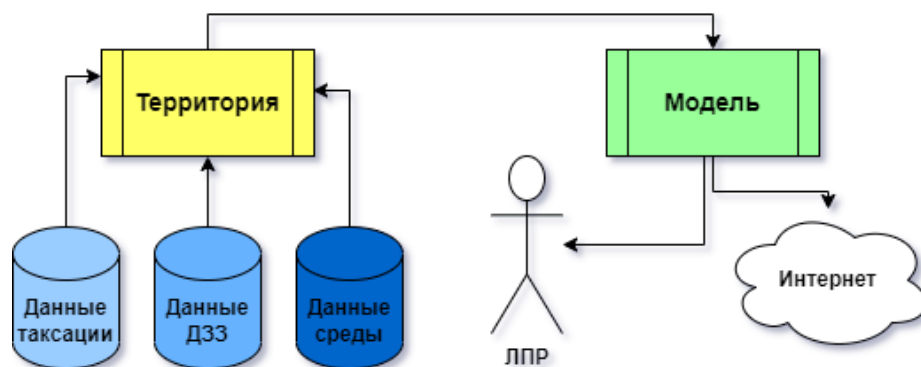


Рис. 9. Схема построения взаимодействия территория-модель

Определим понятие локальная геоинформационная система. Локальная геоинформационная система – это геоинформационная система специального назначения разработка и использование, которой производится под конкретно определенную территорию. Проектирование данной системы начинается исходя из состава географической местности рассматриваемой территории, что определяет её структуру и сложность.

В отличие от обычных геоинформационных систем (ArcGIS, MapInfo, QGIS), в которых процесс создания цифровых карт местности входит в состав функционала программной среды, постепенно наполняя проектируемую карту содержимым (тематические слои) и атрибутивными данными о территориальных объектах, отличительная особенность локальной геоинформационной системы – построение системы исходя из состава компонентов географической территории. В качестве элементов, отличающих от обычных ГИС это исключение неиспользуемых компонентов и модулей геоинформационной системы, интерактивный интерфейс с отображением главных функций системы и динамическим, визуальным отображением геоданных. В зависимости от предметной области использования в состав локальной ГИС входит подробное описание территориальных объектов, визуализация тематических слоёв. Использование локальной ГИС призвано упростить освоение функционала программы для сотрудников сферы лесного хозяйства. Задача будущего развития отрасли лесного хозяйства обеспечить каждое лесничество - локальной геоинформационной системой. Удобство локальной ГИС заключается в полноте и

доступности информативной базы конкретной территории, уровня детализации и описания объектов [119].

При рассмотрении глобальных задач управления лесами, необходимо определить какие компоненты влияют на обеспечение отрасли достоверными сведениями о лесах и какие компоненты лесного хозяйства являются основополагающими среди комплексных задач, какое место может занимать технология геоинформационного моделирования лесов в данном обеспечении. На (рис. 10) представлены основные компоненты задач и технологического обеспечения лесного хозяйства.

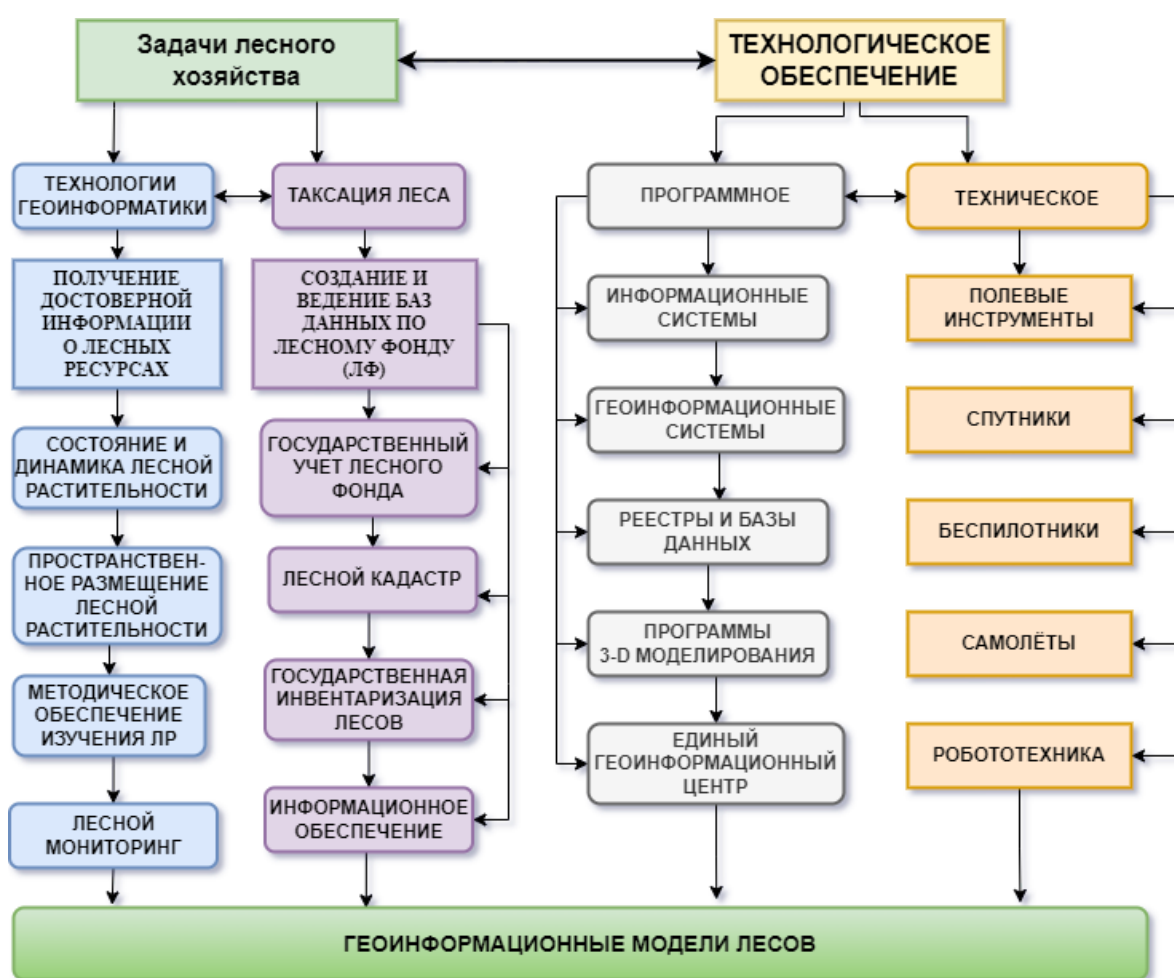


Рис. 10. Основные компоненты лесного хозяйства технологического обеспечения.

Среди основных компонентов выделяются технологии геоинформатики и технологии таксации леса как приоритетные способы для обеспечения решения задач лесного хозяйства. В качестве технологического обеспечения относятся различное программное обеспечение и специальное техническое обеспечение

позволяющее выступать элементом сбора средств геопространственной информации. Задача технологического обеспечения сформировать возможность для будущего процесса построения модели геопространства.

Все модели геопространств построены на основе теоретико-множественного подхода с использованием метрических и топологических свойств геопространств. Все геопространства включают объекты, отношения и операции над объектами. Лесные объекты характеризуются собственным пространством и содержательными признаками.

Формально модель геоинформационного пространства *GISp* представляет собой множество геообъектов с определенными на них отношениями (множество со структурой). Структура пространства задается отношениями и операциями над множеством геообъектов:

$$GISp = (GOB, Rat, Op), GOB \subset (Rm, Sn), m = \overline{2,3}, n \gg m,$$

где *GOB* – геообъекты; *Rat* – отношения; *Op* – операции; *Rm* – физическое (евклидово) пространство; *Sn* – многомерное пространство признаков.

$$OSpGO: GOB \rightarrow Rm,$$

где *OSpGO* – собственное пространство геообъекта, характеризующее его геометрическую протяженность, конфигурацию, форму и ориентацию геообъекта в пространстве. *OSpGO* задает пределы распространения содержания геообъекта в геопространстве.

В рамках технологического обеспечения лесной отрасли геоинформационные модели лесов могут дополнить процесс сопровождения контроля лесопользования, поскольку они являются промежуточным звеном между потоками информационного взаимодействия реальной среды (лесной экосистемы) и лицом принимающим решение в моделируемом геопространстве. Здесь возникает вопрос объективного, надёжного и верифицированного отображения моделируемых геоданных, который будет рассмотрен в работе в последующих разделах.

1.3. Проблематика технологий геоинформационного моделирования лесных экосистем

Представление информации о лесе и отображение характеристик лесных экосистем, должно постоянно развиваться в связи с совершенствованием технической базы, развитием программно-аппаратных средств и геоинформационных технологий, что позволит представлять геоинформацию в интегративной комплексированной форме.

Становится очевидным, что существует необходимость следующего этапа отображения геопространственной информации о лесе, используя современные вычислительные ресурсы и подходы, сочетая это с интеллектуальной обработкой данных в режиме реального времени. Для такого способа отображения информация необходима комплексная технология представления многомерной информации, обработка которой может производиться при помощи технологий машинного обучения. На смену классическому отображению лесных карт, должны прийти интерактивные геоинформационные модели лесных экосистем, построенные на базе технологий геоинформационного моделирования. Тогда создание данных типов моделей можно обозначить как цифровое геомоделирование лесных экосистем – процесс разработки компьютерной модели леса, занимающую определенную географическую территорию, характеризующуюся, как естественными границами, так и искусственными и адекватно отражающий естественные свойства и характеристики леса, с учётом рельефа территории и моделированием входящих в состав системных компонент.

Первая проблема геоинформационного моделирования лесных экосистем состоит в сложности формализации лесной экосистемы в виде её представления как природно-технической сложной системы, необходима категоризация или декомпозиция на различные типы масштабов геоинформационных моделей отдельных объектов представляющих в совокупности лес. Природно-техническая система это целостная, упорядоченная в пространственно-временном отношении

система, состоящая из совокупности взаимодействующих природных, технических, организационных и информационных подсистем [282].

Масштаб формируемых моделей может быть разным в зависимости от целевого назначения моделей. Степень детализации отдельных составных компонентов так же должна быть определена на этапе первой стадии проектирования геоинформационной модели, что позволит исключить лишнюю проработку визуализации и необходимости моделирования некоторых элементов лесной экосистемы или отдельно моделируемого объекта (листвы, хвои, живого напочвенного покрова), не требующих отображения в лесной экосистеме при конкретных задачах [120].

Отображение геопространственных данных о лесе, в виде трехмерной информации необходимо в связи с развитием производительности мобильных устройств (планшетов, смартфонов). Постепенно, данные устройства, входят в практику использования сотрудниками лесного хозяйства в полевых условиях, при проведении таксационных работ [285]. Однако, для всестороннего применения сложных геопространственных моделей, как в полевых, так и в камеральных условиях требуется специализированная программная среда, как для разработки и процесса геоинформационного моделирования земель лесного фонда, так и для качественного процесса управления территориями и принятия ситуационных решений на основе геоинформационной модели лесной экосистемы. В этом направлении можно выделить вторую крупную проблему, необходимости четкого определения использования инструментального обеспечения проектирования геоинформационных моделей лесных экосистем и разработки методологического аппарата для процесса геомоделирования лесов.

Третья проблема, это необходимость отображения не только статичной информации, а динамически изменяющейся с технологией визуального процесса её отображения. Жизнь леса характеризуется определенным промежутком времени, как и его пространственное расположение. Леса находятся в постоянном изменении, они изменяются под действием и влиянием на них как биотических, так и абиотических факторов, все данные изменения стало возможным не только

представлять в виде цифровых геопространственных моделей, но и на их основе прогнозировать будущее состояние лесных экосистем. Необходимо отметить, современные программно-аппаратные средства достигли такого уровня их реализации, что позволяют систематизировать и визуализировать одновременно несколько потоков сложноструктурированной, гетерогенной и объёмной информации исчисляющейся гигабайтами данных, учитывая наиболее точное цифровое представление объектов как внешних деталей моделируемого объекта так их внутренних характеристик. Требуется методологические основы процессов геоинформационного моделирования лесных экосистем

К дополнительным проблемам процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем можно выделить следующие:

1. Сложность формализации лесной экосистемы для интеграции всех типов рассматриваемых данных в среду моделирования.

2. Гетерогенность данных импортируемых в среду моделирования.

3. Отсутствие общепринятых методов формирования трёхмерных объектов насаждений в лесном хозяйстве.

4. Сложность интеграции разнородных геопространственных данных и технологии формирования связей между моделируемыми объектами лесной экосистемы в среде моделирования.

5. Отсутствие инфологической модели процесса геоинформационного моделирования высокого абстрактного уровня представления структуры данных взаимосвязанных компонентов лесных экосистем.

6. Отсутствие технологии верификации подобного вида моделей.

7. Отсутствие терминологического аппарата в области геоинформационного моделирования применительно к лесному хозяйству.

Решение обозначенных проблем для достижения цели исследования позволит сформировать метод геоинформационного моделирования лесных экосистем. Для решения обозначенных проблем предлагается использование современных подходов и технологий компьютерного моделирования на базе использования программных сред моделирования и работы с компьютерной

графикой. Современные подходы геоинформационного моделирования включают в себя использование сочетания технологий компьютерного моделирования, систем интеллектуальной обработки данных и геоинформационных технологий, которые позволяют визуализировать, анализировать, прогнозировать лесные экосистемы в новом способе их представления с учётом изменений в пространстве и времени, что позволит эффективно управлять природно-технической системой. Данное сочетание технологий можно обозначить как цифровое моделирование лесов. Цифровое моделирование лесов необходимо для повышения качества управления лесными ресурсами, используя новые программно-технические подходы отображения пространственно-временных отношений лесных экосистем, произрастающих на определённой территории и обладающих своими уникальными характеристиками.

В диссертационной работе особое внимание уделено способам систематизированной визуализации данных о лесных экосистемах в виде результатов геоинформационного моделирования. Обосновано это тем, что первой особенностью является восприятие информации в виде цифровых моделей, на когнитивном уровне является важнейшей составляющей в скорости принятия человеком решений, в ситуационных оценках, в необходимости использования разносторонней информации комплексно и в принятии решений на уровне территориального планирования при лесопользовании.

Второй особенностью обоснования применения предлагаемых типов моделей на практике является необходимость перехода на избирательное лесное хозяйство, более рациональное потребление лесных ресурсов, учитывающее экосистемные и биологические функции лесов, связанное с климатическими изменениями. Методология геоинформационного моделирования носит практический характер, поскольку оперирует разработанными программами и техническим обеспечением, однако метод является синтезом технологий геоинформатики применительно к задачам лесного хозяйства.

Предлагаемый метод представления информации в виде геоинформационных моделей позволит увидеть лес с наиболее точным

отображением и тематическим составом. Преимущества и основные отличия геоинформационных моделей лесных экосистем от традиционного способа представления информации в виде лесных тематических карт, заключаются в следующих особенностях предлагаемой технологии:

1. Возможность динамического отображения процессов роста древесных растений в цифровой модели. Используя известные закономерности процессов роста и развития в лесных науках, возможно, спроектировать модель таким образом, чтобы при отображении модели леса происходило отображение основных свойств отображающих динамические свойства проектируемых объектов, составных частей в модели, укрупнённой территориальной единицы, на которой произрастает лес. Например, рост древостоев в режиме ускоренного времени, сменяемость древесных пород в зависимости от внешних и внутренних факторов окружающей среды.

2. Геопространственное отображение расположения деревьев по площади, вплоть до отображения конкретного смоделированного дерева. Данный вид представления информации, во-первых, позволит полноценно увидеть рассматриваемый ресурс, как объект управления на уровне всех рассматриваемых фактических древесных пород, входящих в модель, в отличие от таксационных выделов, представляющих только общую однородную совокупность деревьев. Во-вторых, геоинформационную модель также можно разделить на таксационные выдела, при этом геоинформационная модель не утратит своего важного отличительного свойства – возможности постоянного редактирования, изменения и наполнения модели дополнительными геопространственными и описательными данными.

3. Возможность визуализации моделирования сценарных событий происходящих в лесных экосистемах, параметризировать модель с заданными характеристиками. Прогнозируя изменения, происходящие на определенной территории, возможно, заранее формировать стратегии развития управления лесными территориями. Посмотреть на процессы влияния таких важных факторов как повышение температуры, увеличение влажности выпадения осадков и других

климатических характеристик. В данном способе отображения параметрических данных, модель по своему логическому содержанию близка к цифровому симулятору. Поскольку составной частью цифровой модели является отображение не только внутренних свойств объектов системы, но и внешних свойств, функциональное назначение модели, возможно, найти при решении задач моделирования лесных пожаров, скорости их распространения и последующей визуализации лесовосстановительных процессов на горельниках [310].

4.Использование модели на уровне локального управления землями лесного фонда. Не смотря на невысокое материально-техническое обеспечение лесной отрасли на региональном уровне и в подведомственных органах, адаптация и внедрение небольших цифровых моделей в деятельность лесничеств позволит использовать основные преимущества интерактивного отображения модели. При этом, стоит отметить, что для отображения самой модели, не обязательно использование высокопроизводительного оборудования на территории самого лесничества. Возможны варианты применения технологии распределённых вычислительных ресурсов или использования централизованного сервера обработки данных, а рабочие станции, подключенные к такому центру, позволят использовать геоинформационные модели на каждый сегмент управления, что возможно обеспечить через непрерывный доступ средствами вычислительной сети и технологиями передачами информации инфокоммуникационными средствами. Для полноценного функционирования основных свойств геоинформационных моделей леса на сегодняшний день имеется необходимая техническая база и программные средства реализации для построения таких типов моделей.

1.4. Постановка научной проблемы

В отношении формирования точных геопространственных моделей, отражающих реальные свойства природно-технических систем, были посвящены многие труды учёных современности [131-136]. Концептуальная реализация перечисленных трудов всегда направлена на решение практической задачи в определенной отрасли, что позволяет оценить степень влияния различных факторов на рассматриваемую систему и получить новые знания. В практическом выражении в современном лесном хозяйстве Российской Федерации отсутствуют высокоточные геоинформационные модели лесных экосистем, основанные на реальных данных, которые позволят наглядно и эффективно управлять лесными ресурсами. Отсутствие комплексного научно-методического аппарата по разработке, использованию и интеграции технологий формирования цифровых моделей лесов создает объективное противоречие.

С одной стороны, на современном этапе развития науки и техники имеется большое количество данных о лесах, накопленных с начала момента ведения лесоустроительных работ. К таким данным относятся таксационные описания, данные государственной инвентаризации лесов, данные лесопатологических наблюдений, описания постоянных пробных площадей в учебно-опытных лесничествах. Также, стоит отметить, что в большом количестве имеются накопленные данные дистанционного зондирования Земли, отражающие характеристики и изменения лесов в графических форматах данных.

С другой стороны, современные программно-аппаратные средства и средства графической визуализации, технологии геомоделирования, геоинформационного обеспечения и технологии искусственного интеллекта используются в деятельности лесного хозяйства незначительно или в зачаточном состоянии. Фактически, складывается ситуация при которой, существует всё необходимое технологическое и информационное обеспечение, однако отсутствует необходимое методологическое обеспечение, которое описывает применение современных ИТ-средств для реализации их в практической

деятельности лесного хозяйства, в том числе отсутствует описание возможности применения технологий геоинформационного моделирования лесных экосистем.

Однако, существование данных технологий и опыт их применения в смежных с лесным хозяйством областях позволяют провести синтез располагаемых технологических решений как интеграционную технологию, результатом которой являются геоинформационные модели лесных экосистем. При этом, существует проблема отсутствия единой геоинформационной высокотехнологичной среды, функции которой заключаются в отображении и анализе собранных геопространственных данных - характеристик лесов в доступной для восприятия и функционального управления лесными ресурсами форме, отсутствует так же интеллектуальная геоинформационная система являющийся средством систематизированного хранения и обработки геопространственной информации о лесах Российской Федерации.

Научно-практическая значимость использования геоинформационных моделей лесных экосистем позволит использовать опыт накопленный лесоводами-практиками [137-145]. В частности, например в научной работе [146] предлагаются модели развития древостоев Новгородской области до 2080 года, что говорит о возможности в прогнозировании древостоев на длительное время. Геоинформационная модель леса может дополнить систематически собираемые данные, в общей геоинформационной базе земель лесного фонда дополнительно придав ей свойство интерактивности и интуитивной понятности.

Для представления информации о лесе и анализа природы лесов, геоинформационная модель леса, дополненная трёхмерными интерактивными моделями деревьев, с установленными точными характеристиками древостоя, отражающие реальные биологические свойства леса, позволит лицам принимающим решения наглядно увидеть взаимосвязь моделируемых процессов как отдельных компонентов лесных экосистем.

Разработанные геоинформационные модели лесных экосистем, с заданными критериями позволят смоделировать древостой определённой территории в долгосрочной динамике. В нарушенных лесах геоинформационные модели

лесных экосистем позволят проводить проектирование будущего лесовосстановления с учетом поступающих сведений в модель. Особо важная задача для лесного хозяйства – видеть конечный результат возобновления лесов, с учётом длительного по времени процесса роста древесных пород, а также с учётом климатических изменений.

Технологии геоинформатики позволяют подойти к решению и формированию тактики решения научной проблемы – разработки технологии проектирования и формирования научно-методологического аппарата геоинформационных моделей лесных экосистем на базе данных дистанционного зондирования Земли, данных таксации леса и данных трёхмерного моделирования для повышения качества управления лесного хозяйства.

1.5. Выводы по главе 1

В первой главе диссертационной рабы проведён комплексный анализ геоинформационных технологий и обобщён опыт разных стран, научных исследований в области их применения в лесном хозяйстве. Рассмотрены проблемы процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем в целях управления лесным хозяйством. Даны базовые определения и термины технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем и сформирована научная проблема.

ГЛАВА 2.

КОНЦЕПЦИЯ, ПРИЗНАКИ И МЕТОД ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Геоинформационное моделирование природно-технических систем является одним из способов представления информации в моделируемых геосистемах и новых способов понимания процессов протекающих в данных системах. Визуализация и представление геопространственных данных в компьютерной среде позволяет интерпретировать и обрабатывать поступающие сведения на основе геоинформационной модели. Лес – является биогеоценозом, это усложняет процессы моделирования входящих в его состав компонентов, поскольку каждый из составных компонентов биогеоценоза, так же в свою очередь представляет собой сложную систему, как с точки зрения описания математического аппарата функционирования отдельных систем, так и с точки зрения геоинформационного моделирования лесной экосистемы. Геоинформационное моделирование это научный способ познания объектов расположенных в пространстве и времени методом разработки модели исследуемого участка, процесса или явления с использованием программно-аппаратных средств. Одним из факторов, влияющих на необходимость использования технологий геоинформационного моделирования, является фактор возможности оперирования моделями пространственных объектов содержащих в себе предметно-истинные свойства. В научной работе [147], отмечается, что большое количество изобилия пространственно-временных данных, полученных от различных природных геосистем, является новой научной парадигмой, которое оказывает большое влияние на развитие научных направлений в геоинформатике.

Современные программные и аппаратные средства, возможности децентрализованных, распределенных вычислительных ресурсов и появление суперкомпьютеров [286, 287] позволяют заложить основы создания научно-методологических основ геоинформационного моделирования лесных экосистем. Сформировать терминологический аппарат, формализовать основные объектные компоненты необходимые для описания геоинформационных моделей и

входящие в него системные компоненты, с дальнейшей параметризацией, уточнением, корректировкой данных, внесением реальных сведений в проектируемую модель, разработкой методики верификации и последовательности действий формирования моделей.

Детализация отдельных трёхмерных моделей пространственных объектов в цифровой среде на основе технологий компьютерного моделирования и сред разработки на базе графических движков, таких как Unreal Engine 5.1, Unity 3D, аппаратных и программных сред, собираемых данных в области лесного хозяйства может открыть потенциал развития нового систематизированного представления информации о лесных экосистемах. Сущность организации леса в пространстве подталкивает на поиск и разработку таких методов представления данными о лесе, в которых необходимо постоянно видеть ресурс управления наиболее точно и комплексно, с учётом его физических, биологических и экосистемных функций.

Моделирование лесных экосистем является актуальной тематикой, научные труды учёных, таких как: Шанин В. Н., Володченкова Л. А., Дубинский О.Г., и др, раскрывают классические подходы моделирования леса на основе определяемых конкретных параметров [148-155]. В качестве одного из дополняющих методов моделирования, возможно применение упомянутого метода геоинформационного моделирования [288-290]. Развитие отображения геопространственных данных для лесного хозяйства с применением геоинформационных моделей, призвано раскрыть потенциал возможного применения в отображении собранных данных о лесе. Такое отображение данных позволит взаимодополнять технологический процесс контроля лесных ресурсов, как государственным учреждениям, так и частным компаниям, привести в соответствие количественную информацию о лесе в базах данных, с физическим, точным представлением данных.

Возможен подход к созданию открытой, единой региональной геоинформационной модели лесной экосистемы, как экспериментального, выбранного конкретного модельного участка леса, данное направление, при его развитии, позволит привлечь большое количество специалистов для улучшения

работы такого типа проектируемых геоинформационных моделей. К таким подходам совместных объединений в целях оптимизации и разработки, отдельных программных продуктов и их компонентов, относят некоммерческие коллаборатории специалистов над открытыми проектами, к примеру, общеизвестный ресурс GitHub [288].

Использование геоинформационной модели позволит имитировать реальные эксперименты над лесными экосистемами в компьютерной среде, прогнозировать изменения и проводить прогностическое моделирование лесов на основе создания определённой проблемной ситуации, ситуационное моделирование. Функциональное предназначение таких моделей – показать возможность точной разработки процесса или явления и его влияния на моделируемый участок леса. В основе идейного представления применения трёхмерных геоинформационных моделей - наглядная демонстрация, возможности отображения информационного взаимодействия биосистемных функций леса для различных исследователей, формирование отдельного научного направления: геоинформационного моделирования лесных экосистем. Успешными примерами реализации интерактивных 3-d моделей являются работы учёных [156-160]. В данных работах наглядно описывается возможности использования и применения функций трёхмерного моделирования к сложным объектам физического мира.

Пространственно-временные характеристики, отражающие свойства больших по площади территорий покрытых лесами в виде геоинформационных моделей, имеют особо важное практическое значение, поскольку визуально смоделированная среда позволяет решить ряд определённых задач, например для проведения избирательного лесного хозяйства и лесопользования, в частности:

- объективное отображение данных о входящих компонентах в лесную экосистему;
- комплексное представление свойств отдельных элементов входящих в модели лесной экосистемы;

- представление информации о лесе в динамике (в режиме намеренного изменения параметров с учётом развития пространственно-временных отношений);
- анализа предстоящего лесопользования в целях минимизации воздействия на лесную экосистему техногенного вмешательства со стороны человека;
- анализа лесовосстановительных процессов.

В соответствии с обозначенной проблематикой в, задачи развития методического обеспечения реализации технологии геоинформационного моделирования лесной экосистемы состоят в достижении функциональных подзадач исследования:

1.Формирование базовой концепции и определений, формирующих методологическое обеспечение в подходе к геоинформационному моделированию лесных систем.

2.Формирование признаков характеризующих процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем.

3.Выбор объекта, территории геоинформационного моделирования лесной экосистемы.

4.Формирование методики создания определенных типов трёхмерных моделей древесных пород.

5.Формирование уровней представления информации для разработки типологии геоинформационных моделей лесных экосистем.

6.Сформировать модель лесного участка обладающей максимально уточненными сведениями и обладающей предметно-истинными свойствами.

7.Сформировать методику верификации моделей для корректного применения и соответствия ее адекватности.

8.Разработать систему поддержки принятия решений и интеграции разнородных данных визуального сопровождения геоинформационных моделей лесных экосистем и аналитического.

9.Сформировать единый компонент, на базе которого, возможно внедрение технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем комплексно.

Для решения функциональных подзадач исследования необходимо сформировать концептуальные основы геоинформационного моделирования лесных экосистем.

2.1. Концепция геоинформационного моделирования лесных экосистем

Лесные экосистемы – это сложные сообщества преимущественно высших древесных растений, являющихся частью компонентов биогеоценоза, который может быть представлен в виде цифровых моделей при помощи геоинформационных технологий. Поскольку в задачи геоинформатики входит развитие методов отображения пространственно-временных данных различных геосистем, решение поставленной научной проблемы в данном исследовании формируется через технологические методы геоинформатики с одной стороны и применения, современных программно-аппаратных геоинформационных средств с другой. Данное сочетание технологических решений в работе позволит структурировать основные концептуальные подходы геоинформационного моделирования лесных экосистем. Сформированные подходы позволят достичь наиболее полного изложения метода отображения пространственно-временной информации о лесных экосистемах для решения важной народно-хозяйственной задачи - повышения качества управления лесным хозяйством. Категория научной области знаний, в которой раскрываются методы моделирования геообъектов и геопроцессов является актуальной тематикой и направлением в геоинформатике, доказательством этого служат обширные исследования учёных в данной предметной области [306-308].

Задачи геоинформационного моделирования лесных экосистем заключаются в необходимости определения следующих процессов протекающих в лесных экосистемах:

1.Геопространственный анализ размещения растительности.

2. Установление взаимосвязей влияния отдельных компонентов лесных экосистем друг на друга.

3. Прогнозирование развития лесных экосистем в динамике.

4. Визуализация процессов влияния внешних факторов на лесные экосистемы.

5. Визуализация внутренних биохимических и физиологических процессов растений.

6. Анализ информационного обмена между компонентами лесных экосистем.

В практическом плане наличие геоинформационных моделей лесных экосистем позволит:

1. Первоначально принимать управленческие решения на основе анализа систематизированных сведений поступающих от геоинформационной модели.

2. Наиболее грамотно подходить к вопросам долговременного ведения лесного хозяйства, использовать инструменты визуализации геоинформационных моделей для задач связанных с лесопользованием.

3. Перейти к системе оценки покрытой лесом площади для определения выборочных рубок, что позволит перейти на избирательное ведение лесного хозяйства.

4. Проводить наиболее качественно лесовосстановительные работы с учётом постоянно поступающих сведений в геоинформационную модель её систематического наблюдения на основе реальных данных и прогнозируемых, что позволит способствовать процессам лесовосстановления, оценивая данные успешности приживаемости лесных культур.

4. Проводить мониторинг производственных работ противопожарных мероприятий лесного хозяйства, фиксируя текущие изменения в геоинформационной модели. Оценивать параметры лесной экосистемы ситуационно, до момента возникновения лесного пожара, в момент лесного пожара

и анализировать модель лесного пожара, его поведения на основе геоинформационной модели лесной экосистемы.

5. Анализировать причины и места вспышек энтомовредителей, фиксировать их появление в геоинформационной модели, проводить локализацию местности и разрабатывать сценарные события по распространению и развитию лесопатологических процессов, с учётом моделирования отдельных биосистемных компонентов.

5. Проводить эксперименты на основе геоинформационной модели, связанные с анализом воздействия на лесные экосистемы прямых негативных, антропогенных факторов и моделирования деградации состояния экологической среды от них, радиационного, химического характера.

6. Формировать детализированные геоботанические атласы растений на крупные, средние и мелкие территориальные образования, в рамках естественных и административных границ, основой которых является технология геоинформационного моделирования лесных экосистем.

В качестве территориального органа управления лесным хозяйством в современной системе лесного хозяйства выступает лесничество [163], на основании технологических возможностей описанных в первой главе возможна реализация геоинформационной модели целого лесничества. Где количественная оценка леса визуализирована на уровне каждого отдельного дерева, при помощи системы визуализации в среде геоинформационного моделирования. Однако массив геопространственных данных о лесе и технологии контроля фиксации и систематизации таких данных, в деятельности государственных органов, должны быть в составе другого программного продукта, который является официальным инструментом применения цифровых технологий для органов исполнительной власти в сфере контроля состояния лесных ресурсов. Фактически процесс анализа данных на основе готовых моделей это процесс работы субъекта управления с готовой моделью, в задачи которого не входит формирование непосредственно геоинформационной модели всего лесничества. Определить основные элементы

пространственных отношений управления с использованием геоинформационного моделирования можно на схеме (рис.11).



Рис. 11 Понятия пространственных отношений управления с использованием ГМЛ.

ГМЛ – Геоинформационное моделирование.

В качестве основных элементов можно выделить три субъекта управления: георегион, георегион в среде в геоинформационного моделирования и геосистему. В качестве георегиона рассматривается административно-территориальная единица управления лесным хозяйством, лесничество, участковое лесничество, лесной квартал или таксационный выдел. В качестве геосистемы рассматривается покрытая лесом площадь распределённая по природно-территориальным образованиям или комплексам, особенность которых состоит в том, что они могут быть расположены в нескольких регионах и так же могут требовать необходимости их отображения в среде геоинформационного моделирования.

В качестве элементов содержания различных признаков лесных экосистем необходимо обобщение многомерного пространства некоторых признаков геообъектов. Необходимо определить ранжирование признаков по классификационной мере связи $d_v(z, y)$:

для признаков z и y на множестве из N геообъектов.

$$d_p(z, y) = \left[\sum_{i \neq j} |d_{ij}(z) - d_{ij}(y)|^p \right]^{1/p} / [N(N-1)], \mathbf{R} = \|r_{ij}\| - \text{матрица корреляций}$$

Норма связи каждого признака многомерном пространстве признаков (таксономия, типология, районирование)

Дисперсионный анализ: $x_i \in Rg \Rightarrow \sigma_\Sigma \rightarrow \min; x_j \notin Rg \Rightarrow \sigma_\Sigma \rightarrow \max$

Разделяющая гиперплоскость $L(x) = \{x \in E_m : \sum_{i=1}^m a_i x_i - c = 0\}$

Критерий качества разделения: $T^2 = (\bar{x}^B - \bar{x}^A)^2 / \sigma^2(x)$,

$\sigma^2(x)$ – усредненная дисперсия для обеих совокупностей

Понижение размерности многомерного пространства признаков геообъектов

Факторизация признаков геообъектов в многомерном пространстве признаков:

$$x_j = \sum_{i=1}^k l_{ji} f_i + e_j, j = 1, 2, 3, \dots, m$$

x_j – исходные показатели; f_i – значения i -го фактора;

l_{ji} – нагрузка i -го фактора в j -ом показателе; e_j – остатки

Одним из главных свойств в данном ключе должна выступать графическая масштабируемость и визуализация геоданных в инструменте отображения геоинформации. Такое преобразование объектов принято называть цифровым анаморфированием. Каждый из компонентов в модели является цифровым объектом, содержащим атрибутивную информацию о состоянии выбираемой для анализа территории.

Способов построения отображения анаморфирования f_{an} может быть неограниченно много. В общем случае операция анаморфирования обозначается:

$$f_{an}: Ob_{GISp} \rightarrow Ob_{AnSp} \Leftrightarrow u = U(x, y, Par), v = V(x, y, Par):$$

$$Den_{ij} \neq Den_{kl} / (x, y), Den_{ij} = Den_{kl} / (u, v),$$

где U, V – операции анаморфирования (выравнивания плотности), u, v – новые координаты геообъекта; $Par, Par \subset S^n, S^n$ – многомерное пространство

признаков, территориальное распределение параметра (плотность), Den_{ij} – плотность распределения параметра для (i, j) -й ячейки района.

Для наглядной демонстрации составных компонентов лесной экосистемы необходимо представление содержащейся информации в модели между разными её компонентами, совместно с данными трехмерных объектов, данный способ отображения обозначим как динамическое отображение геоданных. Динамическое отображение геоданных – это способ отображения данных, который раскрывает, как физические характеристики геообъектов, так и атрибутивные данные, одновременно с их визуальным сопровождением в виде представления информации компьютерных моделей объектов с учётом их пространственного расположения и отображением изменения реальных свойств в течении определённого времени. Динамика состояния объекта характеризуется свойством его изменения в модели за определённый промежуток времени.

Основные компоненты рассматриваемого взаимодействия между моделируемой системой и лицом принимающего решения представим в виде структурной схемы (рис. 11).

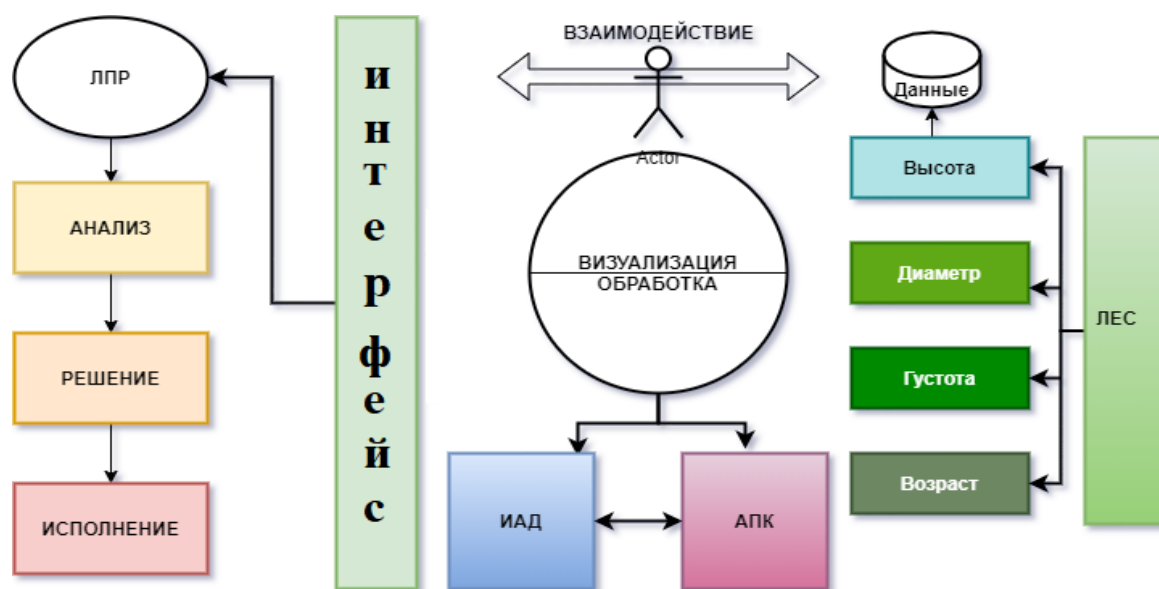


Рис. 11. Основные компоненты и инструменты моделирования
ЛПР - лицо принимающее решение.

ИАД - интеллектуальный анализ данных.

АПК - аппаратно-программный комплекс.

В качестве определения роли и места отдельных элементов процесса геоинформационного моделирования необходимо выделить следующие составляющие. Лес - в модели состоит из многомерных данных, к этим данным относятся таксационные показатели насаждений (диаметры стволов деревьев, возрастная структура, высоты, густота насаждений). Лицо принимающее решение обрабатывает воспринимаемую информацию средствами графического интерфейса на основе поступающих сведений в модели, но не только оценивая параметры визуально, система принятия решений дополняется средствами интеллектуального анализа данных через среду моделирования. В качестве такого инструмента, объединяющего в себе две составляющие, может выступить интеллектуальная геоинформационная система, для отрасли лесного хозяйства предложенная в научной работе [207].

В данном подходе выделяется две основные технологические составляющие: обработка и визуализация. Процесс обработки данных представляет собой поэтапный процесс инструментами интеллектуальной обработки информации и их анализа, к примеру, таксационных данных, являющихся одним из типов обрабатываемых данных в составе компонентов геоинформационной модели. Процесс визуализации данных - процесс представления информации в модели для лица принимающего решения в легко воспринимаемой форме.

Особенность интерактивного представления данных в геоинформационной модели состоит в том, что визуализируются одновременно два процесса: отображение цифровой копии трёхмерных объектов и обработка поступающих данных в модели. Примером такого способа отображения данных является одновременная визуализация определённых сведений в лесной экосистеме. Например, процессы хода роста древостоя или характеристики преобладающей породы на анализируемом участке. Такое отображение потока данных можно обозначить как контекстное. Контекстная визуализация данных - процесс отображения сведений полученных на базе анализа выбранных компонентов и их фрагментов в геоинформационной модели (рис. 12). Лицо принимающее решение

на основе представления информации в такой цифровой модели проводит анализ, оценивает ситуацию, принимает решение и запускает процесс исполнения принятого решения, воздействуя на лесную экосистему извне.



Рис. 12. Контекстная визуализация данных по территории

В классических геоинформационных системах (Map Info, Quantum GIS), как правило, среда визуализации и анализ данных разделены на отдельные программные и интерфейсные компоненты. Сложность визуального моделирования лесных тематических данных состоит в том, что сам процесс моделирования, связан с моделированием изначально территории, на которой произрастает лес. Это отдельный технологический процесс, и он требует использования отдельных программных инструментов и навыков в построении, например, рельефа местности. Затем идёт процесс моделирования отдельно входящих компонентов лесной экосистемы моделируемого участка, после формирования первичной модели – корректировка и соответствие данным в натуре их уточнение. Фактически изначально подготавливаются компоненты 3-d модели, затем идёт процесс проектирования модели территории.

На практике такой способ моделирования геопространственных данных требует разделения полномочий исполнителей на категории: разработчики модели, кто разрабатывает отдельные компоненты модели и тех, кто модель

проектирует и производит объединение геопространственной и трёхмерной информации - проектировщики модели. Однако, это не исключает возможности одновременной реализации двух составных процессов одним исполнителем модели.

Удобство использования таких моделей состоит также и в том, что информацию разделенную на слои данных, возможно отображать отдельными группами, классифицируя её в наиболее удобном виде. Пример интерактивного отображения геоинформационной модели лесной экосистемы на базе технологий лидар и механизмов нейросетевого анализа данных был представлен компанией Инногеотех [123] (Рис. 13).

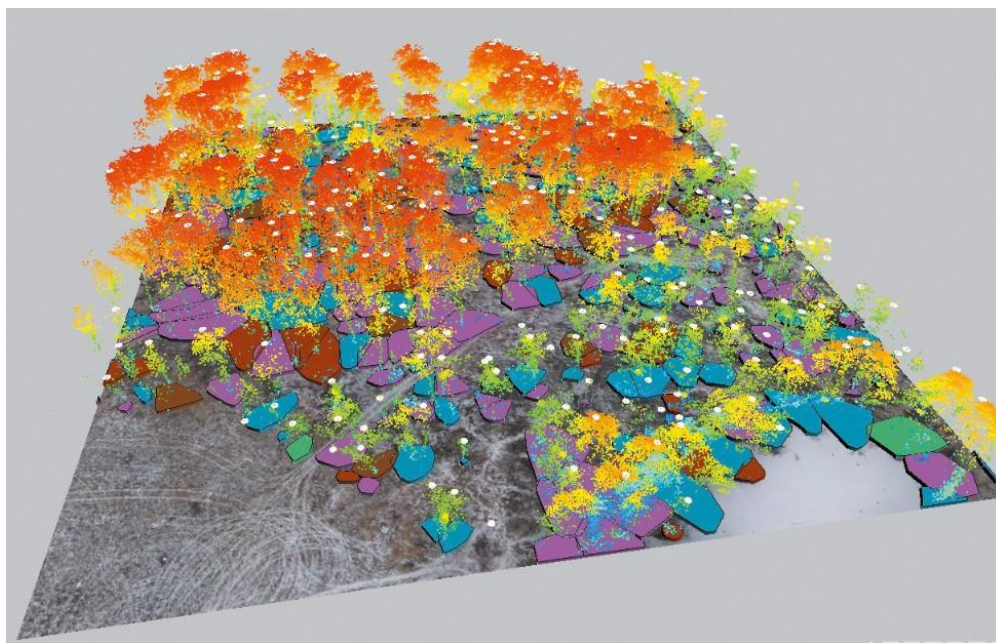


Рис. 13. Пример реализации цифровой модели леса компанией Инногеотех.

Вторая составляющая метода интерактивного моделирования — это детализированное моделирование составных объектов лесной экосистемы. К таким компонентам могут быть отнесены как элементы отдельных растительных сообществ, так и элементы являющиеся частью ландшафта лесной экосистемы - травянистая растительность, лишайники, грибы.

Технология отображения таких компонентов может вестись с учетом активного и пассивного взаимодействия для лица принимающего решения и среды моделирования. Пассивное взаимодействие с геообъектом включает в себя только его 3-d визуализацию без отображения атрибутивных данных, активное

взаимодействие с геообъектом раскрывает его атрибутивное содержимое и вложенные характеристики. Такой способ взаимодействия обусловлен необходимостью представления данных на разных уровнях его восприятия лицом принимающим решение. Активное взаимодействие с объектом начинается с момента его выбора пользователем для уточнения и дополнения сведений об объекте (Рис. 14).

При построении сложно-структурированной трёхмерной модели древостоев, например смешанных насаждений или подроста насаждения возможно пассивное отображение группы моделируемых объектов. В таком случае порог в детализации отображения отдельных групп деревьев определяется лицом принимающим решения, функциями в используемой, к примеру, локальной геоинформационной системой конкретной территории [119]. При этом, масштабируемость отдельных геообъектов позволяет планомерно использовать вычислительные ресурсы исходя из захвата определённого уровня масштаба геоинформационного моделирования и задач анализа лесной территории, фиксации определённой площади плоскости моделирования и масштаба моделирования, отдельных экосистемных компонентов, которая определяет нагрузку на вычислительный процесс.

При максимальном увеличении выделенных объектов, возможным становится анализ не только внешней составляющей геопространственных объектов, но и внутренних, при условии, что некоторые свойства объектов были смоделированы заранее, а после интегрированы в состав геоинформационной модели. Фактически, данная масштабируемость отдельных геообъектов при отключении внешнего слоя, позволяет увидеть объект в разрезе, внутренней проекции, (рис. 14) при программировании его компонентов и внутренних свойств. В таком случае, если в трёхмерной модели геообъекта запроектирована модель его внутренней структуры, то, как правило, такую функцию обозначают как функцию мультимасштабирования внутренней структуры моделируемого объекта.

Функция мультимасштабирования отдельных объектов в разрезе может быть интегрирована в состав среды геоинформационного моделирования, а после разработки модели, возможна интеграция всех данных в состав геоинформационной системы, для отображения биологических и структурных компонентов входящих, в состав лесных экосистем, представляющих особый научно-практический интерес.



Рис. 14. Пример разреза трёхмерной модели ствола Ели обыкновенной после выбора объекта в среде моделирования

Для максимально быстрого перехода от пассивной стадии взаимодействия к активной, осуществляется непрерывная подгрузка данных, скрытая от лица взаимодействующего с моделью. К таким данным можно отнести:

- количество объектов в модели
- выбранная площадь для анализа территории
- требуемое время на отображение информации.

Такие данные можно вывести в отдельном диалоговом окне для их отображения, и они могут быть включены в состав локальной геоинформационной системы, данная задача сводится к настройке пользовательского интерфейса, выбора наиболее удобной информации для отображения информации лицу, принимающему решения. В основе такого детального способа отображения информации лежит принцип разработки локальных геоинформационных систем под конкретную территорию. Использование локальных геоинформационных систем практично и обосновано по следующим тактическим причинам:

1. Система проектируется на конкретную местность.
2. В системе есть ограниченный набор функций.
3. В системе существует ограниченный набор данных.
4. Система имеет локализацию территории.
5. Подразумевается использование системой определённой категории лиц.

Представим, основные составляющие локальной геоинформационной системы в виде предложенном в научной работе [119] (Рис. 15).

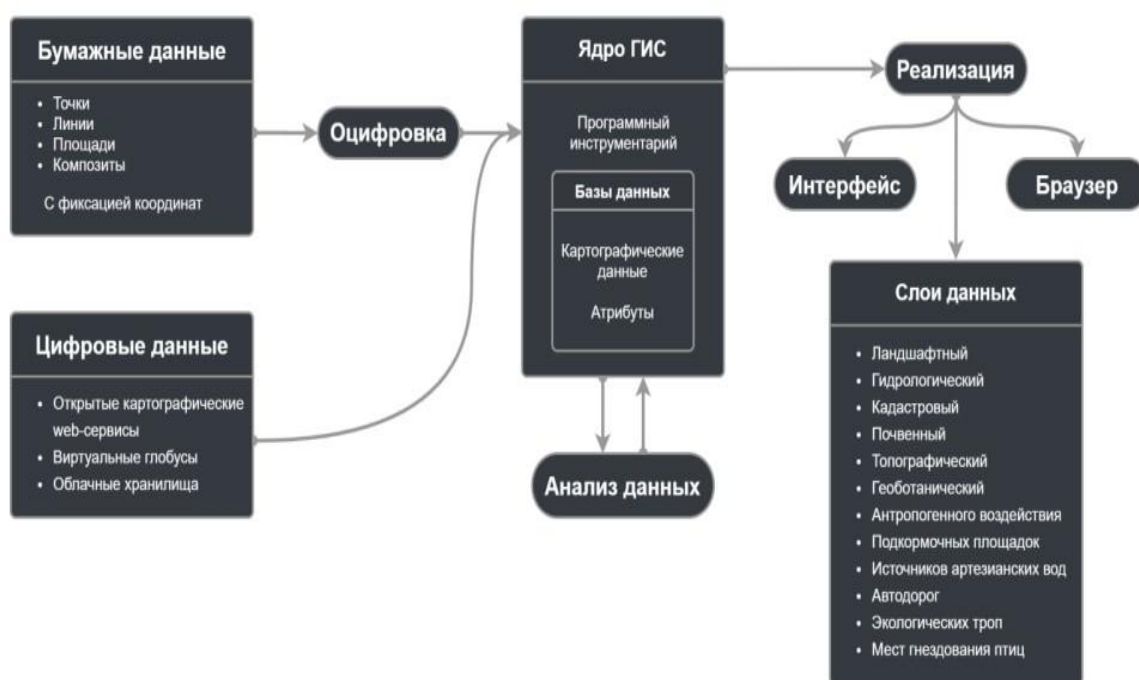


Рис. 15. Состав компонентов локальной ГИС

Как видно на схеме, ядро локальной геоинформационной системы содержит программный инструментарий (функции реализации) и базы пространственных данных. В качестве реализации задач функций возможно использование системы, как в варианте приложения дистрибутива, так и версии загруженной он-лайн. Использование локальной геоинформационной системы возможно как инструмент отображения данных геоинформационного моделирования разного масштаба.

Лесные экосистемы, в зависимости от масштаба и их представления экосистемных компонентов, могут иметь различную смысловую нагрузку для

лица, принимающего решения в зависимости от целевого назначения и тематической интерпретации полученных данных загруженных в геоинформационную модель. Для разного уровня выделения лесоводственно-технической организации и разбиения леса на хозяйственные части масштабируемость лесной экосистемы позволяет определить различные совокупности геопространственных данных древостоев на разных уровнях представления информации для возможности определения однородных показателей леса на разных этапах его жизненного цикла.

В требуемом детализированном отображении, древостоя существует противоречие, так как минимальной учётной единицей в лесном хозяйстве является таксационный выдел, который представляет собой группу деревьев. Структура таксационных выделов не однородна, таксационный выдел не показывает точное количество деревьев, он показывает состав насаждения по преобладающей породе, а в геоинформационном моделировании реализуется каждый компонент лесной системы, отдельное дерево, где возможно отображение таких компонентов как подрост, рельеф с его визуальным отображением.

В традиционных геоинформационных системах картографические данные представлены в виде лесных тематических карт, где совокупности таксационных выделов, объединяются в квартал (рис.9). Анализируя таксационный выдел на лесном плане достаточно сложно ответить на следующие вопросы:

1. Какое количество древесных пород расположено на выделе?
2. Какой точный состав насаждений на всем таксационном выделе?
3. Какая пространственная организация древесных растений на занимаемой территории и её структура?
4. Как расположены типы леса в таксационном выделе?

При подключении дополнительного слоя данных отображения каждого дерева, появляется дополнительный, но важный фактор представления характеристик лесов, численная характеристика, которая отражает реальное количество деревьев, расположенных в таксационном выделе. На первый взгляд, такое отражение данных требует большого количества вычислительных мощностей, как при построении самой модели таксационного выдела, так и при масштабировании моделей на группы таксационных выделов. В данном способе отображения информации существует как техническое решение способов отображения информации, так и процедурное, позволяющее исключить возможность воздействия на процесс манипуляции с трёхмерными данными, обозначенные решения будут раскрыты в данной работе в последующих разделах диссертации.

Однако, необходимо учитывать, что существует необходимость отображения данных на более детализированном уровне представления информации, что позволит анализировать на локальном уровне не только данные по таксационному выделу, но и на меньшей территории. Такое отображение информации позволит, не только отображать основные компоненты лесных экосистем, но и моделировать их биологические, лесопатологические, морфологические и иные особенности отдельно рассматриваемых процессов. Визуализация моделируемого объекта с его точной структурой, к примеру, отдельного дерева, позволит отображать биогеохимические процессы, циркуляцию органических веществ и другие геопротекции протекающие в лесной экосистеме на детализированном уровне.

Важно примечание, что отображение настолько детализированной информации стало возможно на основе развития двух компонентов: общего повышения мощности современных компьютеров и новых возможностей на основе первого компонента, компьютерного моделирования процессов и формализации сложных природно-технических систем, при помощи программирования. Важно указать на разработки в области квантовых вычислений [121-125] и появлении компьютеров на квантовых процессорах [125-

130], в задачи которых отображение сложно-структурированной, многослойной, геопространственной информации для квантовых компьютеров в будущем, не представит собой сложную вычислительную задачу требующей большой производительности и требований к аппаратной части таких компьютеров.

Способ детализированного отображения геоинформационных моделей лесных экосистем обусловлен:

1. Технической возможностью отображения больших объёмов геопространственной информации и сопровождении её графической визуализации, посредством использования вычислительных центров, кластеров, серверов и высокопроизводительной процессорной техники.

2. Интеграцией различных гетерогенных баз данных и наличием элементов принудительной семантической связности баз данных с динамическими объектами трёхмерного представления.

3. Возможностью разработки и подключения модулей интеллектуального анализа данных и их интеграцией в состав геоинформационных моделей лесных экосистем.

4. Удобством управления территорией на основе анализа геоинформационных моделей, точным, естественным представлением геопространственных данных и характеристик лесных экосистем.

Для выявления соответствия технологического проектирования определённых процессов геоинформационного моделирования лесных экосистем и представленными концепциями необходима выработка определённых признаков, характеризующих отличный и полный процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем.

2.2. Признаки характеризующие процесс геоинформационного моделирования лесов

Технологические возможности современных аппаратных средств позволяют использовать сверхпроизводительные вычислительные ресурсы в медиа и игровой индустрии, где имитируются целые физические среды, с работой алгоритмизированных отдельных сложных физических законов, подвижными динамическими объектами и определённой механикой моделируемой среды [186-190]. Стоит отметить, что научная, трёхмерная компьютерная визуализация объектов природы, это один из способов объективного восприятия и познания окружающего мира инструментами которой выступают различные программные средства.

Для развития лесного хозяйства, особенно в период серьёзных климатических изменений на Земле [191-193], в связи с ведением истощительного лесного хозяйства в некоторых странах [194-197], применение геоинформационных моделей лесных экосистем в деятельности арендаторов лесного фонда, лесничеств, природоохранных ведомств будет являться сопровождающим, наглядным инструментом и технологическим способом для рационального лесопользования. Использование описываемой в данной работе технологии приведёт к улучшению контроля и выработке наиболее обоснованных решений при планировании и использовании лесных ресурсов. Переход на рациональное природопользование, остро необходимо, это отмечают учёные разных стран и целые сообщества специалистов [296-298], задача рационального природопользования сохранение биоразнообразия на Земле, одним из способов поддержания лесных экосистем в их первозданном состоянии с минимальной антропогенной нагрузкой это избирательное ведение лесного хозяйства. Под избирательным ведением лесного хозяйства понимается такой способ его ведения, где лесопользование оказывает минимальное воздействие на экологические функции лесных экосистем. За основу берётся принцип минимального антропогенного воздействия на лес при лесопользовании. Применение геоинформационных моделей необходимо для получения новых знаний о лесных

экосистемах, выявления негативных факторов оказывающих влияние на леса. Для реализации поставленных целей в работе будут использованы технологии геомоделирования. Так же, в общепринятой литературе отсутствуют некоторые определения и термины для работы и создания геоинформационных моделей лесных экосистем, что ставит задачу в необходимости формировании понятийного аппарата.

Геомоделирование охватывает широкий круг вопросов создания и использования геоинформационных систем (ГИС), данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), других пространственных данных, и связанных с ними математических методов и алгоритмов [198]. В связи с обозначенным, необходимо указать на необходимость введения новых понятий и определений для реализации процесса геоинформационного моделирования в области применения лесного хозяйства (табл.1).

Таблица 1 Основные определения процесса геоинформационного моделирования лесных систем

Понятие	Определение
Геоинформационная модель лесной экосистемы	Трёхмерная компьютерная модель лесной территории, включающая в себя различные геобъекты и информационные свойства характеризующих абстрактное представление о лесных экосистемах.
Цифровой двойник	Модель любого объекта отображающая его предметно-истинные свойства с визуальным представлением в компьютерной среде.
Моделируемый геобъект	Объект расположенный в пространстве подлежащий моделированию в среде геоинформационного моделирования.
Интерактивное моделирование	Процесс моделирования при котором основная роль в формировании модели предоставляется разработчику модели исходя из его навыков, свойств и выбранного способа моделирования
Интерактивная геоинформационная модель лесной экосистемы	Геоинформационная мультимасштабируемая модель лесной экосистемы разработанная с использованием методов геоинформационного моделирования
Геопространственный цифровой двойник	Цифровой двойник привязанный к конкретной территории и отображающий предметно-истинные свойства характеристик внешних и внутренних свойств.
Среда геоинформационного моделирования	Программная среда основной целью которой является формирование геоинформационных моделей и обладающей необходимым функционалом для создания данных типов моделей.

Однако, отсутствие четко сформированной и структурированной формализации лесной экосистемы в её цифровом представлении не позволяет произвести имитационные эксперименты на основе геоинформационных моделей и использовать их в практическом применении как серьёзного практического инструмента, поскольку для верификации таких экспериментов не сформированы:

- понятия;
- определения;
- признаки;
- методы;
- модели;
- способы применения.

Для развития подходов технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем необходимо сформировать базовые формализованные признаки, которыми должен характеризоваться процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем (табл.2).

Таблица 2 Признаки процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем

Название признака	Атрибут признака	Критерий или показатель
Признак пространственного соответствия	Шкала соответствия	метры
Признак качества данных	Условные единицы	от 0,5 до 0,9, где 0,9 наиболее точный показатель
Признак точности моделей	Показатель G	соответствует/не соответствует (интервал)
Признак системной связности	Наличие онтологической карты	граф, блок-схема
Признак функциональной дополненности	Количество отдельных элементов	кол-во моделируемых элементов

1.Признак соответствия модели – характеризует уровень точного соответствия трёхмерных объектов с привязкой к данным дистанционного зондирования Земли. При проектировании модели необходимо учитывать точное позиционирование дерева, для формирования точного соответствия проектируемых моделей к пространственному размещению лесов.

2.Признак качества данных – данные, на базе которых будет строиться модель леса (дистанционные материалы, таксационные данные, полевые данные или данные полученные с датчиков) должны обладать качественными характеристиками, характеризующие релевантность состояния объекта исследования, к таким признакам можно отнести высокое пространственное разрешение снимков, сбор информации высокоточными, поверенными приборами (табл. 3).

Таблица 3 Коэффициент точности в соответствии с детализацией материалов

Метры	Разрешение	Масштаб применения	Коэффициент точности (усл. ед)
0,1 - 0,5	чрезвычайно высокое разрешение	1: 500-1: 5,000	0,9
0,5 - 1,0	очень высокое разрешение	1: 5.000-1: 10,000	0,8
1 - 4	высокое разрешение	1: 10.000-1: 15,000	0,7
4 - 12	среднее разрешение	1: 15.000-1: 25,000	0,6
12 - 50	умеренное разрешение	1: 25.000-1: 100,000	0,5

3.Признак точности моделей - при формировании трёхмерных объектов растительности, задача отображения таких объектов должна быть сведена к максимальному способу реалистичности, учитывая масштаб цифровой модели и спецификации её назначения. Признак характеризуется определением показателя достоверности геоинформационной модели (G).

4.Признак системной связности – все данные в геоинформационной модели лесной экосистемы, должны быть логически связаны между собой на структурном

и программном уровне. Признак характеризуется положением в пространстве карты отдельных объектов и их онтологическим размещением. Признак системной связности может быть описан посредством графов или проектирования отдельных бизнес-процессов. Необходимость описания признака системной связности в модели характеризуется возможностью редактирования и постоянного дополнения компонентов входящих в лесную экосистему. Так например, семантика отношений “кора-дерево”, имеет логически близкое пространственное расположение отдельно рассматриваемых характеристик, а отношение объектов “форма кроны - тип леса” имеет логически далёкое расположение. Посредством данного признака визуально устанавливаются ассоциативные компоненты входящие в эмпирический набор формализованной базы знаний. Системная интеграция разнородных данных позволит в процессе реализации модели исследовать изменения в моделируемой среде, а так же визуально оценить параметры изменений.

5. Признак функциональной дополненности – функциональная особенность геоинформационной модели леса заключается в необходимости возможности расширения и добавления данных. Большое количество пространственных данных лесной экосистемы интегрированных в цифровую модель – повышает не только ценность такой модели, но и увеличивает важное свойство системы, такое как комплексность модели. Чем больше входящих объектов в геоинформационную модель, наполненную атрибутивными свойствами, тем multifunctionalнее её применение.

В проектируемой геоинформационной модели лесной экосистемы должны быть исключены объекты и процессы, поведение которых противоречит естественному жизненному циклу лесной экосистемы. Исключением должно являться намеренное ускорение жизненного цикла в рамках проведения задуманного эксперимента.

Модель лесной экосистемы считается точной, если она полноценно отражает естественные свойства леса, наполнена атрибутивной информацией о входящих системных компонентах лесной экосистемы и соответствует

обозначенным признакам лесной экосистемы. Для процесса верификации модели лесной экосистемы, после её построения, возможно применение специальных экспертных программ – тест-кейсов, с их применением анализируется отдельно взятая функция и механизм её работы. К таким методам оценки можно отнести корректную работу алгоритмов отражающих жизненный цикл поведения отдельных процессов интегрированных в состав каждой из проектируемых моделей.

Дополнительно оценить точность и функциональную пригодность геоинформационной модели возможно с привлечением специалистов лесного хозяйства, что фактически является экспертной оценкой геоинформационной модели на соответствие отображения данных в модели представления естественных процессов древесных растений и качественного отображения процессов жизненного цикла. При этом, компоненты визуализации разрабатываемой геоинформационной модели необходимо определить исходя из тематического содержания и направленности модели (динамика лесовосстановительных процессов, имитация лесных пожаров, лесопатологические процессы). С учётом полученных от профильных специалистов замечаний в принципах работы отдельных компонент геоинформационной модели, проходит этап их устранения или коррекции на дополнение необходимыми свойствами. Здесь реализация геоинформационной модели близка к логической концепции разработки программного обеспечения, но с уклоном в процесс геоинформационного моделирования, а последовательность действий схожа со спиральной моделью проектирования программного обеспечения (рис. 17).



Рис. 17. Схема проектирования геоинформационной модели

Итогом, такой комплексной оценки, с двух сторон (автоматизированной и аналитической) является заключение качества уровня соответствия моделируемой лесной экосистемы к естественной. Выраженное показателем достоверности G и процентом соответствия модели к реальной лесной экосистеме. Предлагается следующая оценка и названия моделей по их качественному отображению основных типов данных, на базе процентного соотношения геоинформационной модели лесной экосистемы к реальной (табл.4).

Таблица 4. Градация процентного соотношения точности геоинформационной модели лесной экосистемы

№ п/п	Процент точности	Обозначение	Способ оценки / Название
1	0-20%	Низкий уровень соответствия. Характеризуется слабым правдоподобием моделируемой среды. Условное обозначение моделей. Отсутствие моделей процессов жизненного цикла.	Программный; Аналитический Базовая модель
2	20-40%	Слабо-средний уровень соответствия. Характеризуется улучшенным вариантом отображения основных элементов и	Аналитический; Программный

		наличием моделей окружающей среды (рельеф, пространство).	Умеренная модель
3	40-60%	Средний уровень соответствия. Характеризуется наличием основных и вспомогательных компонентов, рельефа и отображением, некоторых данных о составе лесной экосистемы.	Аналитический; Программный Функциональная модель
4	60-80%	Средне-высокий уровень соответствия. Характеризуется наличием большого количества моделируемых компонентов в составе геоинформационной модели и наличием базовых моделей процессов жизненного цикла растений.	Экспертный; Аналитический; Программный Продвинутая модель
5	80-90%	Высокий уровень соответствия. Характеризуется наиболее реалистичным способом отображения как основных так и вспомогательных компонент лесной экосистемы. В модели присутствуют наиболее значимые компоненты, характеризующие жизненный цикл основных и вспомогательных моделей.	Экспертный Аналитический Программный Прогрессивная модель
6	90-99%	Максимальный уровень соответствия. Характеризуется помимо качественного отображения отдельных моделей и высокого уровня соответствия всей моделируемой территории к естественной. Наличием отображения плавного способа переходов жизненного цикла, а так же возможности отображения внутренних компонент и процессов моделируемой среды.	Экспертный Аналитический Программный Многомерная модель

Определяемый процент, позволяет лицу принимающему решения опираться на достоверность отображения информации, что позволит объективно взвешивать полученные факты от модели в критически важных ситуациях, вывод итогового процента достоверности модели должен отображаться в интерфейсе рабочей области пользователя в программной среде. Аналитический способ оценки заключается в выработке процентного соотношения точности модели непосредственно проектировщиком модели на основе опыта реализации геоинформационных моделей и отдельных компонентов. Программный способ оценки заключается в анализе технических реализаций отладной работы

основных функций моделей. Экспертный уровень оценки модели заключается в анализе процессов жизненного цикла и биоморфологических характеристик лесной экосистемы.

Сложность отображения данных природно-технических систем в виде трёхмерных цифровых моделей состоит в том, что здесь используются не только заданные статичные параметры, отражающие только структуру трёхмерного объекта, но и должны присутствовать динамические параметры лесных экосистем. Динамические параметры – это параметры моделей компонент лесных экосистем, которые меняются по заданным условиям и с течением определённого промежутка времени. К динамическим параметрам в геоинформационной модели лесов можно отнести геопространственное моделирование процессов хода роста, как отдельного объекта, так и совокупности объектов, к примеру, древостоев на занимаемой территории. Процессы отображения достижения лесов возрастной спелости, процессы отображения лесовосстановления после пожаров, рубок, а также визуализацию распространения лесопатологических явлений также можно отнести к динамическим параметрам, поскольку они характеризуют объект в пространстве в определённый момент его жизненного цикла. Такое свойство объекта, условно можно обозначить как интервальное отношение.

Интервальные отношения между взаимовлияющими факторами в модели, должны быть сформированы таким образом, чтобы отображать изменения не только на протяжении жизненного цикла конкретного вида дерева, но и учитывать окружающие изменения в лесной экосистеме, поскольку именно окружающие изменения влияют непосредственно на объект моделирования. К таким базовым параметрам, влияющим на будущие состояния насаждений можно отнести, характеристики условий местопроизрастания насаждений, включающие:

- географические зоны;
- влажность;
- тип почвы;
- тип условий местопроизрастания;

- высота местопроизрастания;
- средняя температура;
- продолжительность светового дня;
- структура рельефа;
- степень антропогенного воздействия

Моделирование условий местопроизрастания является такими параметрами, изменение которых в модели, влияет на изменение всех компонентов моделируемых объектов. Возможность внесения изменений в категорию изменения параметров условий местопроизрастания, позволит наиболее достоверно описать и представить, к примеру, процесс восстановления и сменяемости леса древесными породами с учётом изменений биологических, морфологических и экосистемных компонентов лесных экосистем.

Для формирования целевой задачи построения определённой геоинформационной модели лесной экосистемы необходимо соблюдать признаки геоинформационного моделирования лесных экосистем. Для формирования признаков лесных экосистем необходимо обобщить несколько способов формирования, подготовки и представления цифровой информации в виде нового метода, оперирующими современными форматами геопространственных и дополнительных типов данных.

2.3. Метод интерактивного геомоделирования лесов

В качестве формирования нового способа оперирующего подготовленными геопространственными данными необходимо обозначить новый метод, являющийся одним из возможных способов представления данных для многомерной геопространственной информации о лесных экосистемах. Интерактивное геомоделирование лесов является следующим этапом в развитии отображения пространственно-временных данных о лесе. Введение понятие интерактивности в процесс геоинформационного моделирования обусловлено определенными выводами анализа области введения лесного хозяйства и

развитием инструментального обеспечения программно-аппаратных средств и возможностей их адаптации в лесное хозяйство. Можно выделить несколько причин обоснования нового способа представления информации о лесных экосистемах.

Причина первая, лес состоит из многих связанных компонентов объединённых в различные экосистемные группы, что позволяет моделировать не всю систему целиком, а сначала её отдельные компоненты в цифровой среде, постепенно формируя библиотеку цифровых объектов лесной экосистемы.

Причина вторая, представление отдельных компонентов лесных экосистем, это задача не всегда связанная с описанием моделей сугубо на программно-техническом уровне. Опыт, накопленный лесоводами-практиками, лесопатологами, микологами и учёными, чьи исследования связаны с областью исследований экологии леса, можно представить в виде сформированной абстрактной информации, на уровне интерактивной формализации описываемого объекта. Описание состояний объектов растительного мира в определённом жизненном цикле необходимо для детального представления определенных физиологических свойств древесных растений, в виде набора логических правил интегрируемых в моделируемую среду. Такие правила, могут быть переведены и включены как цифровые компоненты поведения растительности в моделируемой среде. Данный процесс требует разделения на лиц моделирующих внешние свойства компонентов лесных экосистем и на лиц программирующих свойства компонентов лесных экосистем, при этом, необходимо чёткое описание логики поведения процесса моделируемого объекта, что соответствует формализации задачи на уровне абстрактных понятий, относящихся к категории разделов предикаторной логики или логики предикатов [302]. На основании комплексного описания поведения моделируемого объекта формируется тезаурус об объекте моделирования, формирование сложноструктурированной модели процесс требующий объединения нескольких специалистов из разных областей.

Третья причина, разделение на лиц производящих разработку модели и лиц использующих модель. После наполнения конкретного тезауруса в области

моделируемого объекта, возможен его программно-технический перенос в среду моделирования, данная задача реализуется при помощи методов объектно-ориентированного программирования. Отдельными компонентами могут быть описаны потоки информационного взаимодействия между отдельными связанными системами.

Например, в работах учёных [161,162] представлены труды описывающие процессы моделирования информационных потоков. Описание информационных потоков может быть реализовано, когда для начала система сформирована и представлена на определенном структурном уровне, как правило, для этого используются инфологические модели, структурно-логическое проектирование или применение нотаций. Процесс геоинформационного моделирования должен в себя включать определенные подготовительные этапы по сбору и обработке геопространственной информации, на основании которой будет происходить процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем.

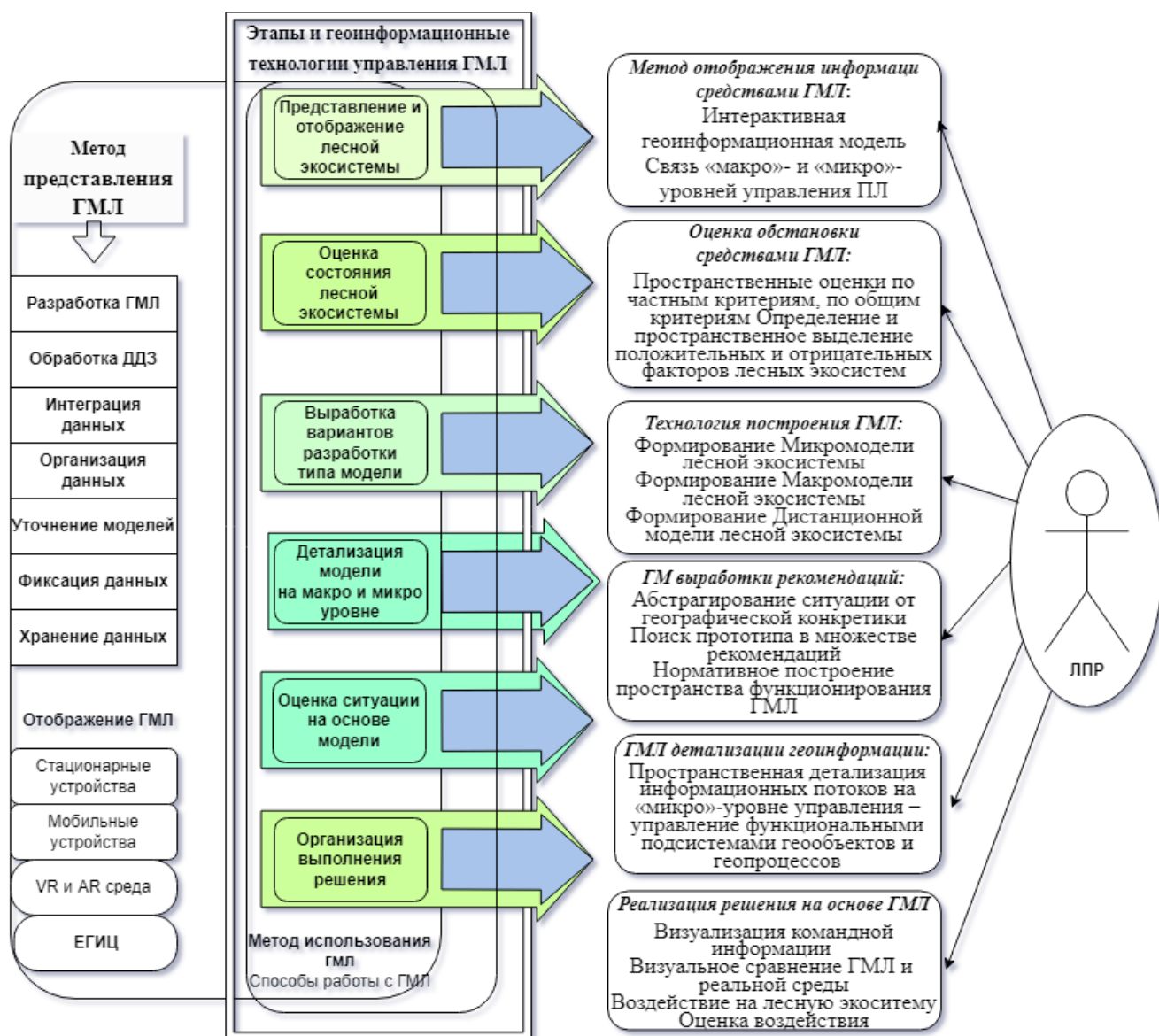


Рис.19 Основные этапы, технологии и методы отображения геоинформационного моделирования лесных экосистем.

Геоинформационное моделирование лесных экосистем включает в себя следующие подготовительные этапы обработки геопространственной информации для будущего формирования модели:

- 1.Предварительная обработку данных дистанционного зондирования Земли, на базе которых будет производиться построение модели.
- 2.Сбор геопространственной информации, при необходимости дополнительными средствами, фиксирующими моделируемую среду.
- 3.Локализацию лесной территории, экспорт данных конкретно выбранного участка леса (таксационный выдел, лесной квартал).

4.Создание каталогов трёхмерных баз данных древесных растений и дополнительных объектов входящих в лесную экосистему.

5. Создание трёхмерной модели участка леса, нанесение объектов на выбранную местность, создание рельефа участка по карте высот, наполнение атрибутивными данными моделей деревьев.

Данные действия, являются основополагающими этапами работ в построении геоинформационной модели лесной экосистемы, однако каждый из этапов включает в свой состав определённые методы и приёмы для достижения конечной цели. В полный состав метода интерактивного геомоделирования лесных экосистем, входит несколько этапов действий:

- работа с подготовкой данных дистанционного зондирования Земли;
- формирование древесных объектов в трехмерном виде;
- наполнение атрибутивными характеристиками объектов геоинформационного моделирования;
- процесс размещения растительности в моделируемом геопространстве.

Необходимо отметить, что в моделируемом пространстве большая часть объектов состоит из различных слоёв-покрытий, лицу принимающему решения требуется в интерактивном режиме их анализировать. Интерактивный анализ слоев-покрытий (множеств) S_i , $i = 1, \dots, n$. Слои оцениваются по отдельности или совместно с другими подмножествами данных об обстановке S_j , $j \neq i$, с помощью следующих операций и процедур пространственного анализа геоинформационного моделирования:

- анализ геоструктур – их расположения, конфигурации, концентрации, динамики, связей, отношений;
- карто и морфометрия, определение простых, «нагруженных» и функциональных расстояний;
- межпространственные переходы – анаморфирование, топологизация, хорологизация;

- классификация и районирование – переклассификация, агрегирование, ранжирование, фильтрация, буферизация и т.п.;
- анализ сетей – маршрутизация, аллокация, оптимизация маршрутов и др.;
- оверлеи (наложения) – точка (линия) в полигоне; математическое, селективное, идентифицирующее, САПР - наложения; векторное и растровое;
- геомоделирование – аналитическое и синтетическое, содержательное (описательное) и пространственное, интерполяционное и экстраполяционное, математическое и картографическое, геодезическое и топологическое.

С помощью приведенных операций и процедур для каждого S_i , $i = 1, \dots, n$ строится отображение:

$$F_i : S_i \rightarrow Q_i \in (ESp_i, ES_i^n),$$

$$ESp_i \in R^m, ES_i^n \in S^n, m, n \in N, m \in \{2, 3\}, n \gg m,$$

где ESp_i - пространственная оценка i -го фактора обстановки; ES_i^n - содержательная (качественная) оценка i -го вида (подмножества) обстановки; R^m - физическое пространство; S^n - многомерное пространство признаков, и мера:

$$f_i : Q_i = \langle ESp_i, ES_i^n \rangle \rightarrow S^n,$$

Полноценная геоинформационная модель леса должна отражать такое количество физических характеристик заложенных в среду моделирования, анализ которых позволит проводить визуализацию данных процессов и на основании этого выявлять отдельные закономерности влияющих подсистем друг на друга, а также наиболее глубоко анализировать отдельно рассматриваемые процессы, происходящие в лесных экосистемах. К таким характеристикам можно отнести наиболее необходимые данные в области ведения лесного хозяйства для их визуального анализа, точное определение состава лесов их запасов и продуктивности. Научной визуализации посвящены многие работы учёных, что подтверждает применение технологий визуализации как способа объективного отображения и формирования определённого представления о состоянии объекта исследования [303-305].

Для выделения отдельных элементов в составе отображения геоинформационных моделей лесных экосистем обозначим два элемента подсистем требующих в свою очередь отдельного моделирования составных компонентов (табл.5).

Таблица 5. Характеристики и индикаторы отображения объектов в геоинформационных моделях лесных экосистем

Модель дерева		Модель лесной территории	
Объект	Характеристики	Индикатор	Характеристики
вид	3-D модель	рельеф	структура рельефа
ствол	морфология внешней структуры (модель ствола)	ПТК	слой с обозначенными границами в пределах рельефа
кора	модель внешней структуры (текстура)	ландшафт	ландшафтный слой в пределах ПТК
древесина	модель внутренней структуры	подрост	3-D объекты
крона	вид и тип кроны, листва, хвоя	тип леса	слой с цветом типов леса
высота	длина ствола	живой напочвенный покров	структура компонентов в виде 3-D слоя
возраст	внешние признаки модели	геологические компоненты	дополнительные 3-D объекты части ландшафта

На основании полученной информации от геоинформационной модели возможно строить прогнозные и вероятностные модели, по заданным сценариям. В интерактивной геоинформационной модели леса должны быть отображены лесоводственные характеристики объекта моделирования (тип леса, таксационные характеристики лесов, точные размеры пород деревьев и их морфологические особенности). Параметризовать и уточнять модель можно непрерывно, постоянно наполняя её динамическими свойствами, вплоть до отображения параметров характеризующих среду произрастания, климатические факторы в режиме реального времени. Среди основных компонентов интерактивного

моделирования можно выделить технологический способ проектирования модели, который возможно сформировать на базе существующих прикладных программных систем по разработке отдельных типов данных для геоинформационной модели. Для описания процесса представляющего собой последовательность действий по разработке такого типа моделей, в котором лесная экосистема является основным компонентом для отображения и моделирования, необходимо дать ему определение.

Интерактивное геомоделирование лесов - процесс создания (разработки) компьютерной модели леса занимающего определенную географическую территорию, в определенном масштабе модели и при помощи определённых инструментов компьютерного моделирования. Интерактивность характеризуется показателем взаимодействия представленной информации и её возможностей отображения и мультимасштабирования, а также процессом размещения и технологией разработки отдельных трёхмерных моделей древесных растений, лицом принимающим решения, методикой создания геоморфологии рельефа и отдельных системных компонентов в составе проектируемой модели.

Первый способ. Процесс разработки отдельных 3-D моделей древесных пород, так же можно обозначить как интерактивный процесс, поскольку разработка 3-D моделей, как правило, ведётся ручным способом на основе анализа реальной структуры лесной площади, обученным специалистом или 3-D дизайнером. Такой процесс может проводиться при помощи инструментов трёхмерного моделирования, оператор, работающий над созданием отдельных моделей, при этом формирует пространственную структуру растительности.

Второй способ размещения растительности в пространстве, полуавтоматизированный с использованием, специализированного, профессионального программного обеспечения и алгоритмов, например случайного веса, когда требуется распределение растительности для моделирования в определённой ситуации (рис. 18). Такой способ позволяет сформировать будущее представление и технологию размещения, например, лесопосадок, отобразить структуру древостоя.

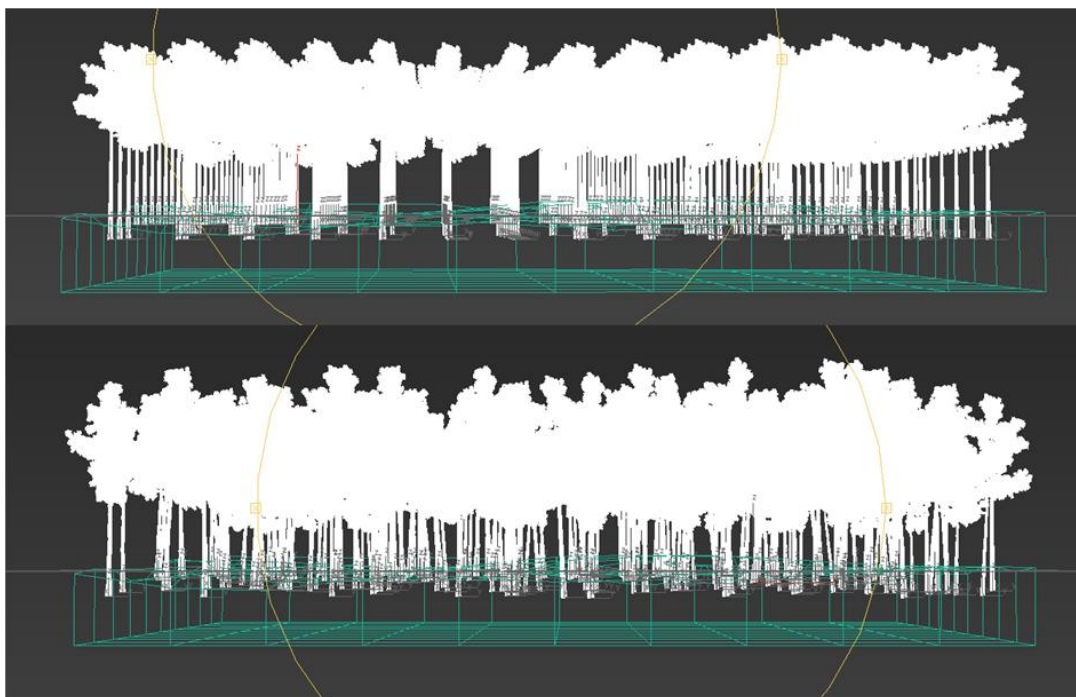


Рис. 18. Проектирование модели лесного участка в среде 3d-Max с использованием алгоритмов случайного веса.

Основная задача интерактивной модели предоставить лицу принимающему решение наиболее полную и точную картину объекта управления. Формирование новых способов лесовосстановления посредством геоинформационного моделирования. Для формирования организационной структуры компонентов геоинформационного моделирования необходима инфологическая модель.

2.4. Инфологическая модель компонентов геоинформационного моделирования

Для реализации всех компонентов, последовательности действий входящих в состав геоинформационной модели леса, необходимо сформировать инфологическую модель, описывающую структурно-логические связи и выделяемые уровни отображения данных, и основные компоненты описываемой системы. Основными задачами инфологической модели является представление и иерархическая структура отдельных компонентов, что позволит понять взаимодействие различных объектов на уровне информационных потоков происходящих в моделируемой среде. Такой уровень описания может стать

нотацией для проектирования объектов природно-технических систем, в данном виде обозначен как модель представления основных данных и элементов геоинформационной модели лесной экосистемы (рис. 19).

Объекты, представленные в виде набора разнородных данных с трёхмерным отображением и расположенных в пространстве, обладающие определёнными предметно-истинными свойствами реальных объектов, можно обозначить как геопространственные цифровые двойники. Основная задача таких двойников – точное представление и отображение характеристик моделируемых объектов.



Рис. 19. Основные компоненты геоинформационной модели леса

Для формирования концептуальной схемы определены основные составляющие являющиеся компонентами для способа геоинформационного моделирования, для наполнения моделью определёнными данными, что впоследствии позволит проводить обработку и фактическое декомпозиционное отображение выбранных объектов моделирования.

Базовые инструменты и их определения в геоинформационной модели лесной экосистемы.

1.Компьютерное моделирование – совокупность инструментов, как программно-технических, так и имитационных сред включая, программы по разработке компьютерной графики (Wolfram Mathematica, 3D Max, Blender и др.) симуляторы в режиме реального времени (Any Logic и др.). Позволяют разрабатывать, импортировать и визуализировать необходимые геопространственные данные.

2.Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – являются одним из взаимодополняющих типов данных и основного элемента, на базе которого строится геоинформационная модель леса, поскольку именно он отображает и подтверждает истинное количество и пространственную организацию древесных растений. Важно принимать во внимание факт большого количества свободно-распространяемых открытых данных дистанционного зондирования Земли в глобальной сети, как в высоком качестве, так и в среднем. Использование такого ценного источника информации для дистанционного исследования лесов, позволяет подойти к вопросу, систематизированной обработки представленных таких данных, и развитию методов геоинформационного моделирования. К данным дистанционного зондирования Земли можно отнести и данные полученные с беспилотных летательных аппаратов, такие данные, как правило, обладают большим пространственным разрешением.

3.Таксационные данные – данные собранные при проведении таксационных работ. Являются источником наиболее точной информации содержащей сведения о лесах, выражающаяся в символьных значениях, которая

может быть интегрирована в состав геоинформационной модели лесной экосистемы. Именно интеграция таксационных данных в модель позволит корректно отображать свойства однородных по составу насаждений в пределах занимаемой площади, проводить анализ совокупности выбранных деревьев и анализировать информационные потоки, происходящие в модели.

4.Локализация данных. При построении многоуровневой модели отражающей определенные свойства занимаемой площади в геоинформатике принято проводить процедуру локализации геоданных [175]. Данная процедура позволит систематизировать наборы геоданных и определить их взаимосвязь на уровне построения логической связности между элементами рассматриваемой системы.

Для формирования геоинформационной модели леса можно исходить из характеристик географических особенностей территории покрытой лесом, геоинформационная модель может быть основана:

1.На базе данных административных границ по принципу деления системы лесоустройства (модель участкового лесничества, модель квартала, модель таксационного выдела). Задача такой модели обеспечить поддержку в системе принятия решений на уровне государственного управления в пределах территориального образования.

2.На базе данных природных границ, это могут быть ландшафтное районирование или зонально-типологическая модель лесов, которые характеризуются экологическими границами леса или ареалами распространения определённых видов растений [176]

3.На базе выделения чистых составов насаждений, модель Ельников Ольшаников, Березняков, Липняков, Дубрав. Задача данного типа моделей продемонстрировать географические особенности распространения пород в зависимости от местопроизрастания и их характеристик.

5.На баз конкретной задачи, для ситуационной оценки - имитации. Задача такой модели совместить различные условия для анализа и визуализации

результатов проведения экспериментов. К таким задачам стоит отнести имитирование в цифровых моделях лесов техногенных аварий или природных катастроф. Здесь модель лесной экосистемы не привязана к конкретной территории, а представляет собой обобщённую имитацию территории с наличием на ней древесной растительности.

5. Геосистемное разделение лесной экосистемы. Задача проектирования геосистемного разделения сводится к такому способу отображения и представления геопространственных компонентов входящих в состав проектирования лесной экосистемы при котором, описываются отдельные экосистемные компоненты и сообщества. К примеру, в составе спроектированной системы можно выделить отдельно рассматриваемые подсистемы при проектировании участка леса занимающего большую по площади территорию, возможно выделение небольших участков на которых преобладает определенное сообщество растений (темнохвойные леса, светлохвойные леса) с целью их изучения, на базе разделения объектов входящих в определенные категории.

Основные типы представления данных в геоинформационной модели и их логическое разделение позволяет определить связи между различными объектами. Типы представления данных в геоинформационной модели описывают точку зрения на процесс проектирования модели и входящих в него компонентов. Компоненты в модели разделены логически. Логическое разделение на определенные категории является обозначением, на какой конкретно тип информации нацелена разработка и отображение данных в модели.

2.5. Моделирование составных объектов лесной экосистемы

Геоинформационная модель леса должна обладать полнотой сведений о моделируемой среде и об объектах, которые являются входящими в среду моделирования. В основе системной интеграции дополнительных данных является разработка таких решений, при реализации которых, формируется комплексность восприятия данных лицом принимающим решения и автоматизация технологических процессов для ускорения анализа данных входящих в построенную модель. Основная цель интеграции разнородных данных - максимально эффективное управление моделью, как следствие управление объектом моделирования в физической среде. Задача системной интеграции различных типов данных в геоинформационной модели получение синергетического эффекта комплексирования информации и информационных потоков. Предоставление сценарных вариантов развития лесной экосистемы на основе механизмов геомоделирования и научной визуализации отдельных компонентов в модели, анализа импортированных пространственно-временных данных в модели.

Типы данных в геоинформационной модели. Восходящий уровень описания объектов. Для формирования данных в геоинформационной модели, согласно инфологической модели (см. рис. 19) используется принцип иерархической структуры данных. Технологическое отображение вышеописанных типов объектов, тесно связано с возможностью изменения слоёв данных, изменением трёхмерных объектов с течением времени, возможностью визуального перехода 3-d объекта из одной жизненной стадии в другую. В классических геоинформационных системах, как правило, слои данных не изменяются без воздействия оператора на изменения свойств данных отображения. Принудительное изменение данных является следствием выполнения программных операций, функции, алгоритма, скрипта к таким данным. При процессе геоинформационного моделирования сначала

формируются геопространственные объекты, входящие в состав геоинформационной модели, затем описываются их параметры и поведение при изменении заданных параметров, далее задаются изменения границ слоёв данных при описании конкретного сценария, для этого в составе модели должны быть определены основные характеристики и свойства взаимосвязанных компонентов.

В общем случае форма древесных растений может быть отнесена к пространственным атрибутам или модели собственного пространства как объекта геомоделирования или геообъекта. Геообъекты лесных экосистем характеризуются собственным пространством и атрибутами (содержательными характеристиками):

$$GOB = (Sp_{GO}, Atrib),$$

где Sp_{GO} – собственное пространство геообъекта; $Atrib$ – содержательные характеристики геообъекта.

$$Sp_{GO} \subset R^m, \quad Sp_{GO} = \langle Disl_C, Form \rangle,$$

где $Disl_C$ – координаты центроида геообъекта; $Form$ – форма (конфигурация, протяженность) геообъекта.

Для $m = 2$ координаты центроида определяются из системы

$$d_1 = ax + by;$$

$$d_2 = cx + dy.$$

Форма геообъекта задается географическими границами (контуром), а также количественными характеристиками этого пространства – ориентация, длина, ширина, извилистость, характер границы и т.д.:

$$Form = \{ H, B, Or, Ln, Sq, V, Cl \},$$

где H – высота; B – ширина; Or – ориентация; Ln – длина контура; Sq – площадь; V – объем; Cl – целостность объекта.

Содержательные параметры геообъекта принадлежат многомерному пространству признаков ($Atrib \subset S^n$) и характеризуют сущностные параметры его собственного пространства.

В соответствии с представленной инфологической моделью предлагается описание основных типов геообъектов, которые возможно описать на программном уровне, что подразумевает объектно-ориентированное описание абстрактных сущностей программируемого геообъекта и его поведения.

1. Объект описания - динамические объекты. Логически разделенные объекты данных, трёхмерный набор данных в среде моделирования, в которые заложены определенные свойства, характеризующие отдельно взятый объект моделирования по его признаку и изменяющийся с течением времени, т.е. в динамике.

2. Объект описания - динамические слои. Слой данных в геоинформационной модели наложенные поверх стандартного, используемого набора данных и изменяющегося с течением времени. Реализация динамического слоя в среде моделирования возможна при помощи технологии API – интерфейса прикладного программирования или при помощи технологий анимации.

2. Объект описания - отдельное дерево. Каталоги деревьев породного состава, трёхмерные библиотеки, шаблоны паттернов и правила построения пород деревьев на определённой жизненной стадии их развития.

3. Объект описания - территориальное образование с древостоем. Любое территориальное образование на котором произрастает лес. Технология отображения лесных геосистемных структур строится на базе целевого назначения модели, при помощи инструментов моделирования или геоинформационных систем.

4. Объект описания - интервальное отношение, непрерывное или циклическое поведение объекта с изменением времени. Интервальное отношение - свойство динамических, трёхмерных объектов лесной экосистемы, в составе геоинформационной модели, которое показывает процесс изменения объекта во времени в зависимости от выбранного временного интервала на определённой жизненной стадии лесной экосистемы. Интервал в модели задается лицом принимающим решение, при этом, он может работать в двунаправленном

состоянии, как моделировать будущие процессы лесной экосистемы, так и регулировать переходы в прошлые состояния (рис. 20).

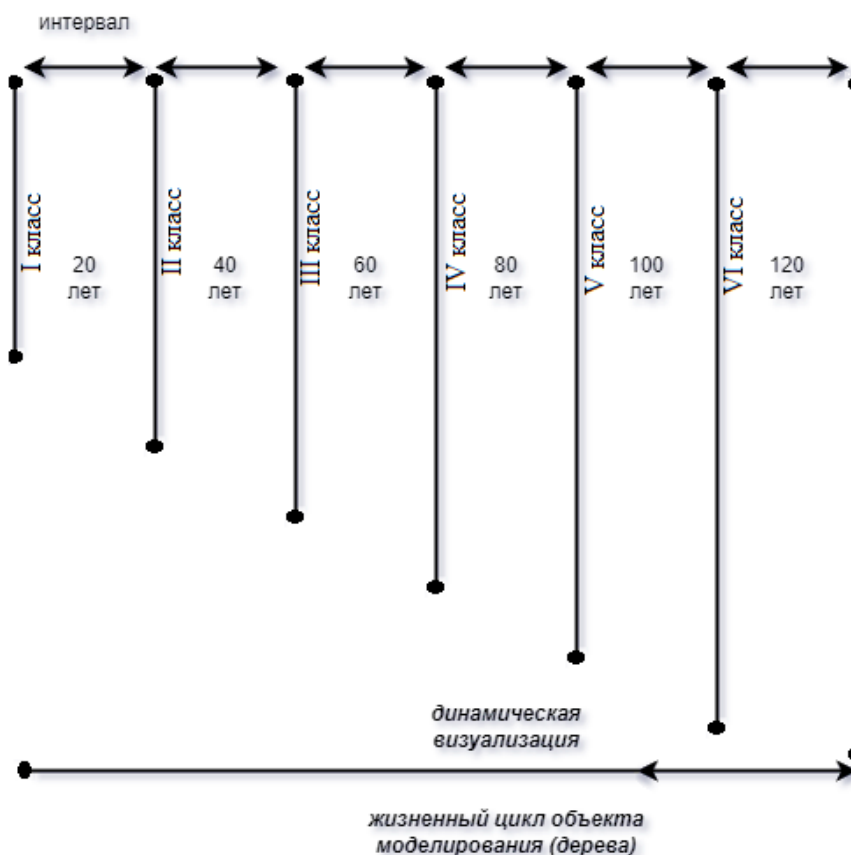


Рис. 20. Представление интервалов возраста трёхмерного хвойного дерева для процесса геоинформационного моделирования

5. Объект описания - пассивный динамический слой. Это заданный слой данных который не изменяется с течением времени, к таким типам слоёв можно отнести например почвенный слой, который можно интегрировать в состав геоинформационной модели. Интервальное отношение задается по минимальному и максимальному значению, активация слоя, например распространения процесса в пространстве производится относительно, указания на каком конкретно временном интервале, необходим запуск симуляции дополнительного процесса временного интервала симуляции.

6. Объект описания - активный геодинамический ландшафтный слой. Отображение слоёв в виде лесных ландшафтно-морфологических характеристик,

анализ и построение укрупнённых моделей базирующихся на природно-географических границах лесов.

7. Объект описания - системные критерии в геоинформационной модели, критерии характеризующие изменения физики среды моделирования (влажность, влияние температуры на объекты, уровень солнечной радиации, осадки). Системные критерии необходимы для отображения физических явлений в модели геоинформационных моделей.

8. Объект описания - карта поведения. Характеристика заданного жизненного цикла лесной экосистемы в определённых условиях на основе заложенных алгоритмов и характеристик отдельных элементов. Карта представляется в виде набора семантических правил и структурно-логических схем взаимодействия компонентов лесной экосистемы друг с другом.

Объекты описания это определенные инструменты, характеризующие процесс геоинформационного моделирования, как отдельный абстрактный уровень формирования логики и поведения объектов моделирования.

2.6. Типы геоинформационных моделей лесной экосистемы

При формировании геоинформационной модели леса системное представление компонентов геоинформационной модели, достигается:

1. уровнем описания связности различных элементов системы. Посредством фиксации связи между объектами. Теснота связи между элементами может быть выражена при помощи фиксации родительских классов с дочерними, интегрированных в состав свойств конкретных моделей. На данный момент при моделировании трёхмерных объектов и их составных элементов такие связи выстраиваются при помощи процедуры скриптинга, что является процессом графического программирования объектов моделируемой системы.

2.проектированием сценария поведения лесной экосистемы при заданных параметрах на основе имитации физических закономерностей в моделируемой среде. В данном аспекте выделяется объектно-ориентированный подход моделирования классов объектов и его изменение посредством влияния на него воздействующего параметра. Достигается данная задача методами процедурного программирования и описания поведения самих отдельных классов конкретной 3-d модели или геосистемы в целом.

Главное условие в процессе формализации объекта моделирования отражение его предметно-истинных свойств. Достигается данное условие следующими подходами в процессе создания модели:

- 1) Интегрированием объектов моделирования состоящих из гетерогенных данных в среду моделирования.
- 2) Точным соответствием технологии моделирования объекта в натуре.
- 3) Созданием организационной структуры модели и карты поведений.
- 4)Проектированием большого числа экосистемных компонентов и их типизацией.

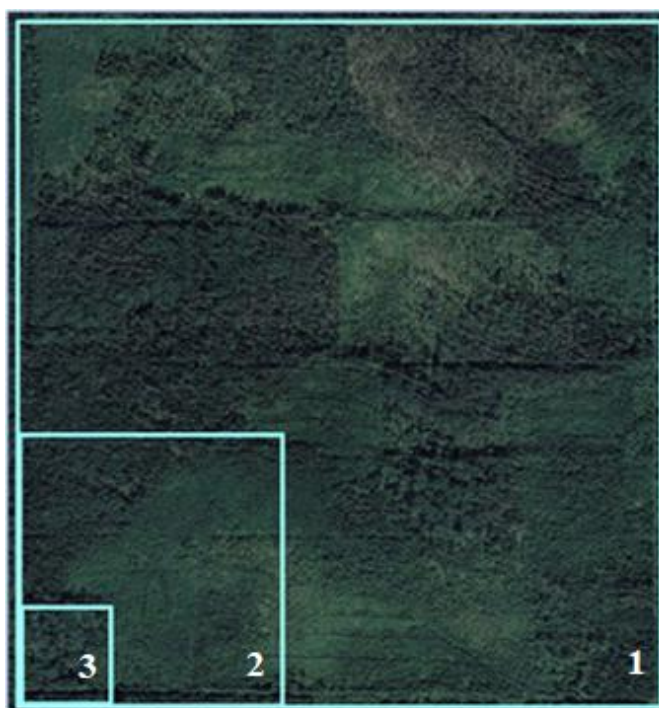
Варианты отображения модели. Основная концепция системной интеграции данных в модели заключается в способе визуализации всех компонентов её лицу принимающему решения. Здесь, характерной особенностью геоинформационной модели является способность представления определённого объёма информации для лица принимающего решения. На основе этой информации, возможно намеренно изменять поведение проектируемой системы, на основе заложенных правил, интервальных отношений и алгоритмов. Достигается данная задача разработкой алгоритмов процессов поведения отдельных геообъектов в пространстве с изменением во времени и перехода 3-D объектов из одного состояния в другое. Данный эффект широко известен в анимации и дизайне [177-180], когда необходимо за короткий промежуток времени продемонстрировать жизненный цикл определённого объекта или целой системы. Для такого способа отображения информации в модели необходима

база объектов которые позволяют демонстрировать процессы перехода из одной жизненной стадии к другой. Одним из таких показателей, является временная характеристика древостоя - класс возраста дерева, поскольку он характеризует определенное состояние дерева на определённой его жизненной стадии, в определённом временном интервале. Важно при проектировании геоинформационной модели лесной экосистемы воспринимать информацию о модели комплексно, видеть её структуру и с учётом пространственного размещения моделируемых древесных пород.

Моделировать с процессом визуализации полноценный цикл жизненной стадии древостоя возможно, однако для этого требуется среда моделирования, аппаратный комплекс для визуализации компонентов системы и сценарий развития поведения лесной системы на таком уровне его отображения, при котором достигается эффект соответствия представления характеристик объекта в цифровой среде с его реальными свойствами в натуре. Для формирования процедуры визуализации необходимы алгоритмы описывающие процессы жизненного цикла разных компонентов лесных экосистем, однако процессы проектирования самих моделей не связаны с математическим обеспечением, поскольку для проектирования моделей используется математический аппарат среды проектирования, которые задействует проектировщик моделей.

В зависимости от целевого назначения задач использования модели, выделим три уровня представления геоинформационного моделирования лесной экосистемы. В данном контексте вариант отображения модели в среде моделирования характеризуется не природно-географическими особенностями лесов, а масштабом представления лесной экосистемы от целевых задач управления территорией.

Декомпозицию моделируемого лесного участка можно разделить на три основных уровня представления данных (рис. 21).



1) дистанционная модель - $S = 100$ Га

2) макро модель - $S = 10$ Га

3) микро модель - $S = 0,1$ Га

Рис. 21. масштабы геоинформационных моделей лесных экосистем

1 первый тип представления модели глобальный уровень представления лесной экосистемы в виде *дистанционной модели лесной экосистемы*. В данном способе представления объектов в модели удобно анализировать и исследовать географические процессы распространения растений, рассматривать отдельные, экосистемные компоненты леса на уровне совокупности видового разнообразия растений и других компонентов входящих в лесные биогеоценозы.

2 второй тип представления модели локальный уровень представления лесной экосистемы, *макро-модель лесной экосистемы*. На данном уровне представления лесной экосистемы, подразумевается большая степень детализации на уровне отдельно взятого участка леса, здесь представление системы носит локальный характер. Возможно отображение однородного по составу насаждения, таксационного выдела, территориально обособленной границы, отдельного элемента леса размером менее одного лесного квартала [165].

3 третий тип представления модели микро уровень, *микро-модель лесной экосистемы*. Данный тип модели удобен в способе визуализации и отображении не только растительных объектов, но и в разработке отображения в цифровой модели важных структурных биологических элементов на микроуровне представления. К таким элементам можно отнести формирование в компьютерной среде подстилающего слоя леса, состоящего не только из высших растений, но также из мхов, лишайников и грибов, включая в себя живой напочвенный покров и травянистую растительность.

В зависимости от типа разрабатываемой модели будет зависеть способ отображения и представления основного моделируемого объекта в лесной экосистеме - леса, группы сообществ древесных растений и в более концентрированном смысле, модели конкретного дерева. Удобство представления модели дерева в трёхмерном виде обусловлено следующими характеристиками:

- имеется возможность просмотра дерева в разных плоскостях
- имеется возможность выделения группы 3-d деревьев
- имеется возможность отображения на минимально возможном масштабировании с просмотром таких особенностей, как кора и ветки.

Такое разделение на три компонента представлено на схеме (рис. 22).

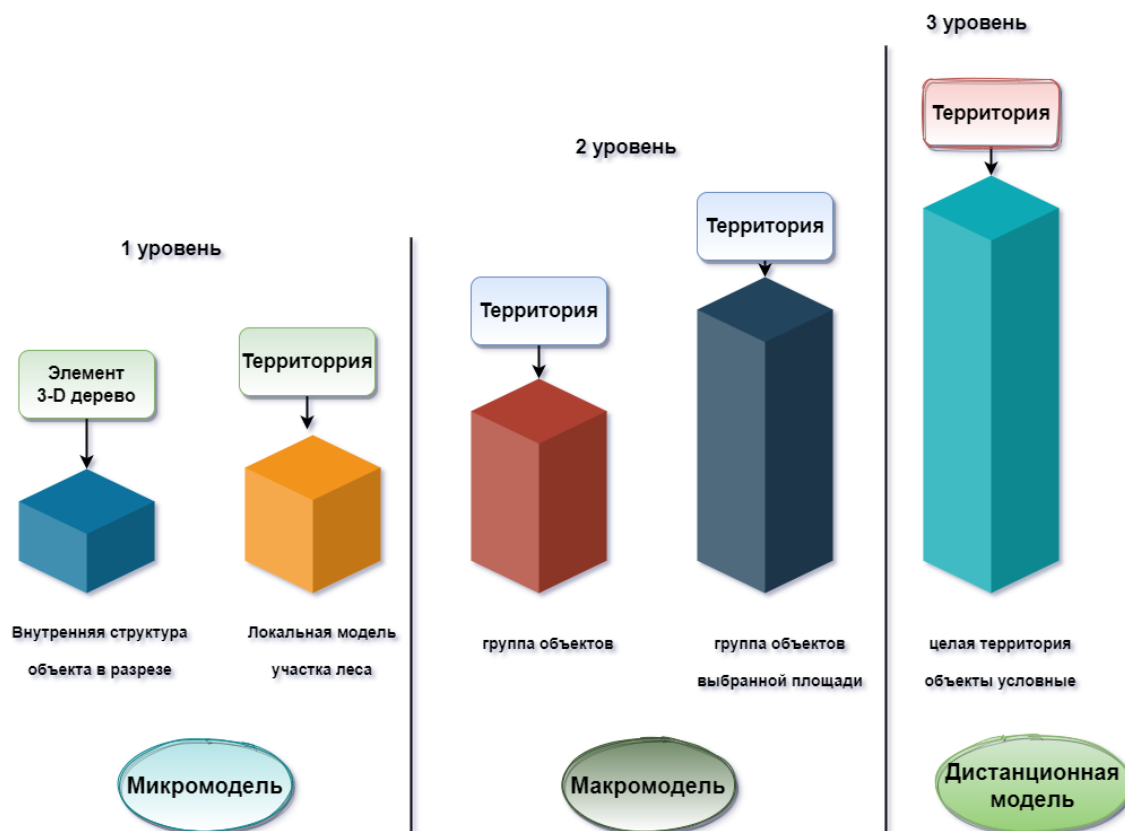


Рис. 22. Представление уровней организации геоинформационного моделирования лесных экосистем

Уровни организации геоинформационного моделирования лесных экосистем позволят формировать определённые типы объектов входящих в состав моделируемого масштаба. Моделируемые компоненты в микромодели и дистанционной не пересекаются, а компоненты макромодели и микромодели могут иметь наличие одинаковых моделей в обоих типах масштаба, однако степень детализации данных компонент – разная. Как правило, с увеличением масштаба, степень детализации прорабатываемых особенностей морфологической структуры увеличивается. Основной компонент, на базе которого происходит моделирование вспомогательных элементов это древесная растительность, которая присутствует во всех трёх типах сформированных масштабов.

2.7. Трёхмерные модели хвойных пород деревьев для геоинформационной модели лесной экосистемы

Построению трёхмерных моделей на основе геоинформационного проектирования посвящены научные работы Андреевой О. А. где указаны базовые понятия в области геоинформационного моделирования, описывается теория множеств и математическая логика для использования геокодирования и проектирования совокупности трёхмерных объектов [237,238]. В данном научном направлении, стоит отметить научные работы Ткачевой А.А., где обозначены возможные математические и программные методы моделирования растительности. Особенность в данных работах заключается в том, что авторы отмечают отсутствие единого и общепринятого подхода при моделировании различных геообъектов, в том числе, геоинформационного моделирования растительности, одним из выбранных подходов моделирования является реализация математических алгоритмов средствами программирования [166-168].

При создании геоинформационной модели лесной экосистемы на подготовительном этапе, требуется разработка таких моделей древесных пород, при которых их отображение соответствовало наиболее естественному, реальному отображению лесных экосистем. В научной работе Билла Флеминга [199] были предложены общие концепции по проектированию трёхмерных моделей растений и насекомых, в данной работе рассматриваются в основном вопросы по трёхмерному проектированию декоративных растений. При проектировании такой системы как лес на каждый тип моделей древесных растений необходимы отдельные базы данных характеристик трёхмерных моделей деревьев. При этом, такие базы данных должны учитывать региональные особенности насаждений, поскольку от места произрастания насаждений зависят их моделируемые характеристики, возможно разделение на базы данных моделей административно-территориальной организации лесного

хозяйства и географических особенностей лесных экосистем. Для удобства проектирования разных типов моделей деревьев их можно разделить на две категории – низкополигональные и высокополигональные, то есть состоящие из разного количества сетки полигонов, основного элемента геометрической поверхности дерева в совокупности образующего единый трёхмерный объект.

В геоинформационной модели 1 типа (дистанционная модель лесной экосистемы) отображение трёхмерных моделей деревьев условное, поскольку целевое назначение модели - представление информации в таком масштабе, при котором оцениваются не отдельные параметры каждого дерева или группы деревьев, а крупные ландшафтные и географические особенности лесов. Именно по данному свойству в модели ей дано определение как дистанционная модель, то есть, характеризующая признаки лесной экосистемы в дистанционном способе её отображения, при котором видны крупные экосистемные, географические особенности лесов. Здесь отображение геопространственной информации характерно для анализа крупных геопроцессов лесной экосистемы, визуализация пород деревьев носит условный характер, однако важно соблюдать признак пространственного соответствия, точного размещения растительности в пространстве согласно их естественному расположению на основе материалов дистанционного зондирования Земли.

Поэтому в качестве экономии вычислительных ресурсов в больших масштабах отображения, возможно использование низкополигональных трёхмерных деревьев, в которых отображение внешнего вида моделей носит условный, упрощённый характер (рис. 23).

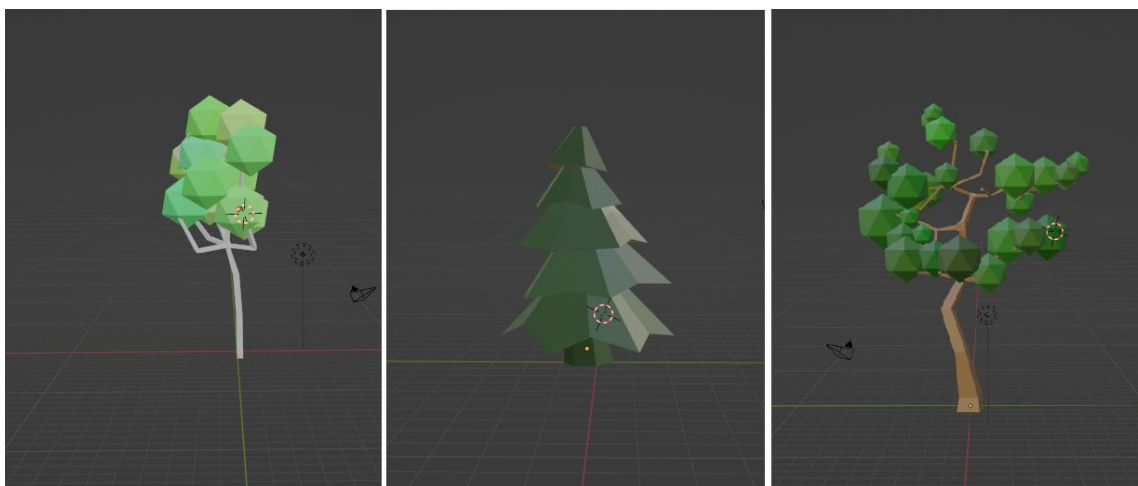


Рис. 23. Низкополигональные 3-d модели Берёзы, Ели и Сосны

Преимущество использования низкополигональных трёхмерных моделей состоит в том, что они обеспечивают стабильную работу всей геоинформационной модели и интерактивное отображение данных большой лесопокрытой площади, связанное таким способом отображение не только лесных экосистем, но и природно-территориальных комплексов, геокомплексов различного генезиса и состава позволит оценить крупные территории покрытые лесом наиболее комплексно.

За основу такого способа расположения, возможно использование подложки материалов дистанционного зондирования Земли, с чёткой географической привязкой моделируемых пород. Позиция моделируемого 3-d дерева соответствует позиции дерева на подложке данных дистанционного зондирования Земли. Достичь точного соответствия пространственного расположения можно как методом интерактивного проектирования всех 3-d моделей на подложке оператором, так и автоматизированным способом используя алгоритмы машинного обучения или нейросетевую обработку процесса моделирования, что успешно применяется в схожих к лесному хозяйству областях [169-171].

Высокополигональное моделирование древесных растений. Для геоинформационных моделей лесной экосистемы 2 и 3 типа (макро и микро-модели), характерна высокая точность отображения информации, поскольку

здесь восприятие объектов входящих в лесную экосистему необходимо на более качественном уровне. Детализированное отображение объектов позволяет повысить признаки качественного соответствия модели и обеспечить лицо принимающее решение наиболее полными сведениями о рассматриваемой системе и входящих в неё экосистемных компонентов. Поэтому разработка базы данных определённой группы пород деревьев позволит провести как систематизацию объектов входящих в среду моделирования, так и обеспечить определённым набором моделей, что сократит время последующего процесса геопространственного проектирования лесной системы. Важно отметить, что процесс разработки свойств 3-d дерева, это не лимитированный по времени процесс, компьютерная 3-d модель хранит все внесённые в неё изменения, что позволяет повышать качество отображения информации последовательно, наполняя модель и постепенно улучшая отдельные морфологические характеристики моделируемых объектов, на их определённой жизненной стадии.

В научном направлении трёхмерного моделировании биологических объектов существуют подходы к процессу построения различных трёхмерных моделей деревьев, например в работе автора [173] отмечается о возможности проектирования моделей древесных пород посредством алгоритма средствами Python API и алгоритма Space Colonization. Однако важно отметить, что построение ветвлений посредством используемого алгоритма не дополняет систему одним важным свойством, свойством соответствия данных их естественному отображению - итоговой модели к реальному насаждению. Поэтому полученные таким способом модели, больше подходят для медиаиндустрии, где не требуется точное отображение всех естественных характеристик древесных растений. При использовании алгоритма, основанного на L-системе, проектируемая цифровая модель дерева хоть и приближена в общем смысле, к построению условного дерева, однако, в сравнении с морфологическими характеристиками реальных древесных пород выглядит искусственно и неестественно [173] (рис. 24).



Рис. 24. Модель дерева построенного на базе алгоритма Space colomization.

Одним из способов получения трёхмерных моделей насаждений используют устройство лидар. При получении данных посредством лазерного сканирования деревьев формируется только облако точек части модели дерева. Поскольку точки в пространстве рассеиваются не равномерно, то достаточно сложно перевести полученный массив данных в полноценную модель трёхмерного дерева с его полным и точным отображением морфологических характеристик. Фактически точки не покрывают всю структуру дерева. Это хорошо определяется по полученным данным (рис. 25) в работе авторов [200].

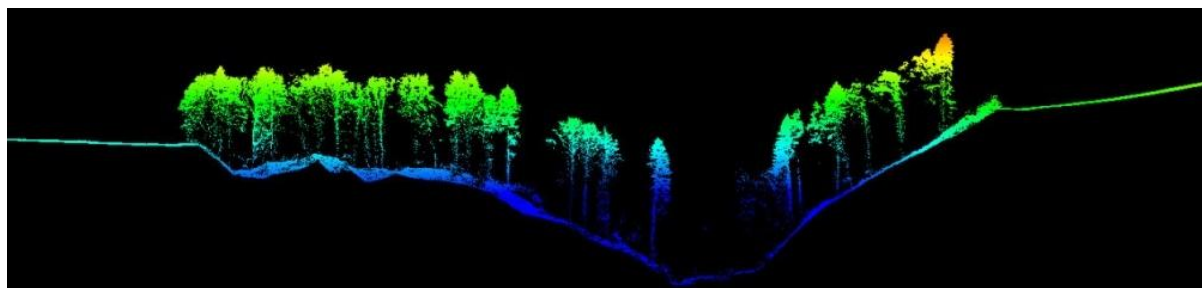


Рис. 25. Пример структуры изображения древостоя посредством технологии Лидар

Прерывистые участки ствола, не полные части крон или полное отсутствие стволов просматривается на полученных данных, это недостаток комплексирования информации, отсутствие ряда недостающих данных, незафиксированных лазером. При комплексировании данных и мультимасштабировании модели, до структуры просмотра отдельного дерева

даже после наложения цветового распределения точек основанной на системе цвета RGB, сформированная таким образом модель отдельного дерева становится практически неразличимой (рис. 26).



Рис. 26. Модель дерева после интеграции цветового компонента RGB и данных облака точек на базе Lidar

Такова техническая особенность съёмки при помощи сканирования леса лазером. Поэтому, технологии получения информации о лесе, не должны излишне замыкаться на применении только одного технологического подхода для сбора информации о лесе. Однако нельзя не отметить полезность применения данного подхода при применении определённого круга задач и большой технологической работе авторов проведённых в работе [200].

Стоит отметить, ещё одну особенность затруднения применения технологии лидар в России в промышленном масштабе, это большая площадь покрытой лесом территории. Например, в странах, где лесные ресурсы являются редким природным ресурсом, возможен как сбор, так и обработка такой геопространственной информации более детально средствами лидаров. Например, в Японии или Финляндии где территориальная особенность лесов

данных стран имеет мелкий масштаб организации хозяйственной деятельности с учётом наличия плотной транспортной инфраструктуры, что позволяет применять комбинированные методы по учёту древесных ресурсов. В России, в виду особенностей территориальной организации лесов, инфраструктуры лесного хозяйства, удалённости населённых пунктов и расчёта стоимости проведения лидарной съёмки, возникает вопрос о целесообразности проведения такого цикла мероприятий получения геоданных и её последующей сложнейшей обработки, систематизации и хранения. Гораздо логичнее использовать уже готовый большой объём дистанционных и спутниковых материалов оптического диапазона и связать его с технологиями геоинформационного моделирования.

На (рис. 25, 26), видно, что полученные таким способом трёхмерные модели на основе данных облаков точек, является структурно не полными, поскольку требуется дополнение ряда данных недостающих данных в моделируемом геопространстве геообъекта, в частности в структуре ствола и крон моделей деревьев. Трёхмерные модели деревьев, напротив, представляют собой ограниченный цифровой объект, с замкнутыми контурами, который локализован чёткими границами, может иметь естественные цвета, и более точную моделируемую биометрическую структуру дерева. Сравнение двух типов моделей представлено на (рис. 27).

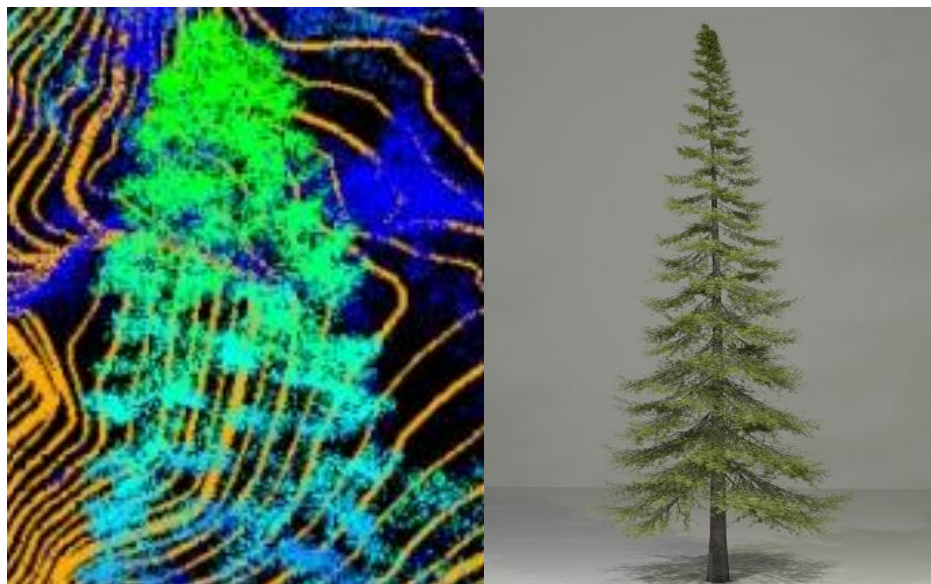


Рис. 27. Слева модель Ели, полученная при помощи Lidar, справа модель Ели смоделированная в Blender

Для геоинформационных моделей 3 типа (микро-уровень представления лесной экосистемы системы) наиболее полезным свойством отображения является не условные модели деревьев, а свойство максимальной детализированности структуры насаждения. Такая точность представления информации позволит в дальнейшем, при импорте разных типов данных в общую геоинформационную модель лесной экосистемы, наполнять модели объектов атрибутивными свойствами, повышая качество восприятия информации для лица принимающего решения.

Основой для разработки трёхмерной базы данных лесообразующих пород и последующего процесса геоинформационного моделирования лесной экосистемы, являлся анализ территории 196 квартала Лисинского учебно-опытного лесничества на основе полевых исследований в период 2020-2022 годы, филиала Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова, расположенного в Тосненском районе, Ленинградской области.

Основными моделируемыми древесными видами являлись лесообразующие породы, в данном исследовании в виду большого количества

проектируемых моделей было принято решение на первом этапе сконцентрироваться на трёхмерном моделировании хвойных пород деревьев. Согласно лесохозяйственному регламенту основные хвойные породы Ленинградской области Ель Европейская и Сосна обыкновенная.

Структура процесса моделирования включала в себя установление основных биометрических параметров дерева, его характеристик на определённой жизненной стадии. Для этого, известными способами, проводились измерения основных морфологических показателей Сосны обыкновенной и Ели обыкновенной при помощи таксационных приборов.

Одним из удобных способов разделения древостоев по возрастной структуре является разделение древостоя по классам возраста. В исследовании принято решение о проектировании 3-d моделей древесных пород на каждый класс возраста дерева, с I-класса до VII-класса, что соответствует моделированию 3-d деревьев шагом в 20 лет, от 20 лет до 140 лет. В качестве сбора информации о характеристиках хвойных древесных пород определялись некоторые их морфологические данные.

Для проектирования трёхмерных моделей описывались основные требуемые для переноса в среду моделирования таксационные и биометрические характеристики, на основе полученной информации были сформированы базы данных для моделей проводилась фотофиксация хвойных пород и проводилось описание морфологических характеристик для будущих моделей проектируемых 3-d деревьев, в их число входили:

- высота дерева
- диаметр ствола
- характеристика текстуры коры
- среднее количество веток на стволе
- среднее расстояние между ветками в каждом классе возраста
- цвет поверхности хвои
- цвет поверхности коры

Далее в среде моделирования Blender разрабатывалась отдельно каждая модель дерева на каждый класс возраста. Для этого, при помощи инструментов моделирования формировался ствол, размечались ветви (рис. 28), отдельным этапом моделировались хвоя и шишки (рис. 29).

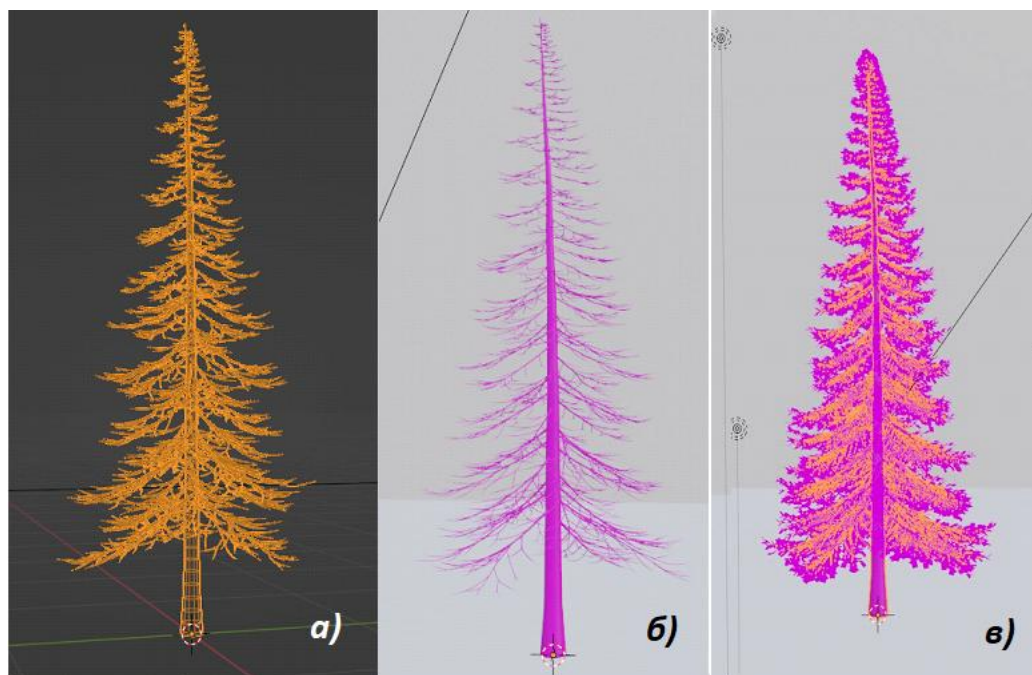


Рис. 28. Моделирование ствола и веток сосны обыкновенной IV класса возраста (60 лет): а) разметка ствола и ветвей, б) нанесение текстур, в) импорт покрытий

Среди мелких деталей требующих отображения как составной части трёхмерного дерева это моделирование хвои и шишек. Такие элементы требуют отдельной проработки, но именно за счёт них формируется представление информации на уровне микромоделирования лесной экосистемы. Данные компоненты можно, как включать при необходимости, так и отображать их условный вид. Моделировать такие компоненты возможно за счёт фиксации данных с использованием вспомогательных элементов, например фотоустройств с возможностью фотофиксации в режиме съёмки макро.



Рис. 29. Моделирование хвои, слева до интеграции в модель, справа после

В качестве основного функционального инструмента здесь используется инструмент в среде моделирования Blender “система частиц”, именно он позволяет отображать большое количество объектов на выбранной поверхности, например, хвою, после применения инструмента и выделения зоны поверхности, можно сделать активным слой отображения дерева со всеми входящими слоями данных.

В процессе моделирования устанавливались основные морфологические характеристики хвойных деревьев, фотофиксация деревьев в натуре позволяла дополнять естественными характеристиками на каждом классе возраста проектируемую модель. Важно отметить, что в процессе фотофиксации фиксировались координаты местности, что позволяло фиксировать морфологические особенности хвойных пород в местах и произрастания. Основные биометрические данные были зафиксированы в виде базы данных, на которые получены свидетельства о государственной регистрации.

Моделирование текстуры коры выполнялось так же в среде Blender, где происходил импорт зафиксированной части изображения коры соответствующего класса возраста, после чего UV-развёрткой переносился на всю поверхность текстуры целого 3-D объекта (рис. 30).

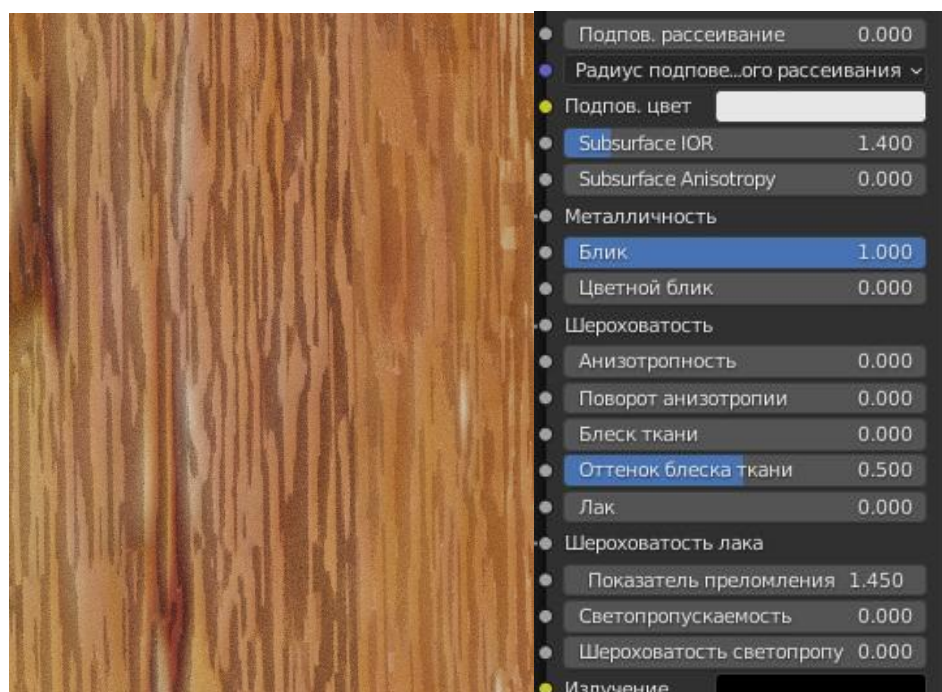


Рис. 30. Моделирование текстуры коры

После соединения компонентов со стволом и ветвями поверх накладывалась текстура коры (рис. 31). Этап наложения текстуры, возможно, дополнить некоторыми особенностями, присущим структуре поверхности коры определённой древесной породе, это неровности, выпуклости, шероховатости, в таком случае поверхность ствола дерева, наполняется формируемыми данными модели проектирования, которые возможно интегрировать дополнительными средствами, например фотосъёмкой полученной с беспилотного летательного аппарата, конкретной породы, конкретного дерева и его морфологических особенностей. Однако, такая проработка деталей не характерна для отображения в дистанционной и макро-модели лесной экосистемы, для отображения мельчайших деталей и состава отдельных недревесных компонентов лесных экосистем на микро уровне представления геоинформации, предлагается в микромодели лесной экосистемы описание которой будет раскрыто 3 Главе данной работы.



Рис. 31. Импорт текстуры коры на 3-d модель Сосны обыкновенной: а) вид с кроной, б) вид ствола снизу вверх

Аналогичным образом составлялись модели хвойных пород других классов возраста на II, III, IV, V, VI и VII класс возраста (рис. 32, рис. 33).



Рис. 32. Высокополигональные трёхмерные модели Сосны обыкновенной I-III класса возраста

После чего, формировались модели Ели обыкновенной (см. рис. 33). Каждый из сформированных каталогов проходил регистрацию в федеральном

органе исполнительной власти по интеллектуальной собственности с присвоением государственного номера. В работе были отдельно разработаны 3-d каталоги на лиственные и хвойные породы деревьев учебно-опытного лесничества.



Рис. 33. Высокополигональные трёхмерные модели Ели обыкновенной с I по VI класс возраста

Формирование моделей лесообразующих пород позволит формировать основные представления о исследуемом участке, арендаторам земель лесного фонда представлять характеристики лесного участка, а лесным инспекторам позволит проводить управление и контроль за лесными ресурсами. Общую методику проектирования 3-D моделей деревьев можно указать в виде схемы (рис. 34).



Рис. 34. Общая сформированная методика процесса разработки базы данных трёхмерных объектов

- Этап 1 определение класса возраста породы для моделирования.
- Этап 2 моделирования ствола дерева.
- Этап 3 моделирование веток.
- Этап 4 моделирование текстуры коры.
- Этап 5 моделирование микро-деталей хвои, шишек.

Сложность процесса моделирования хвойных пород заключалась в большой нагрузке на вычислительный процесс при отображении всей хвои дерева, поэтому, при проектировании 3-d моделей хвойных пород деревьев, желательно выполнять процесс моделирования хвои на последних этапах моделирования.

Формирование каталогов трёхмерных моделей в перспективе может быть расширено до максимального класса каждой из моделируемых пород, так же расширены могут быть и моделируемые породы насаждений, к таким родам могут быть отнесены: Ива, Граб, Ясень, Ольха серая, Ольха чёрная, Вяз и другие породы. Отдельным направлением можно выделить геоинформационное моделирование насаждений в урбанизированных территориях, где фактически насаждения можно формировать изначально, определяя их внешнюю структуру, пространственное расположение, проектировать породный состав и определённые эстетические качества.

2.8. Трёхмерные модели лиственных пород деревьев для геоинформационной модели лесной экосистемы

Основной целью данного этапа является формирование единой 3-D базы данных двух лесообразующих пород: Берёзы повислой (*Betula Pendula Roth.*) и Тополя дрожащего (осины) (*Populus Tremula L.*) для интеграции сформированного каталога моделей деревьев в среду геоинформационного моделирования лесных экосистем [201].

Подход формирования определённых каталогов баз данных 3-D моделей деревьев в рамках укрупнённых территориальных единиц, например на основе федеральных округов, может стать началом формирования единого полноценного каталога моделей древесных растений. Совокупность сформированных таких типов данных в едином пространстве, можно обозначить как цифровые двойники лесов, в рамках совершенствования и трансформации лесного комплекса и необходимости развития технологий учёта древесной растительности на территории России. Единая цифровая модель может быть использована в качестве инструмента государственной инвентаризации лесов, поскольку в таком способе отображения информации есть каждое дерево. Формируя такой геоинформационный комплекс данных, возможно, интегрировать и стандартизировать для использования предлагаемые модели в рамках государственного управления лесами на основе цифровой копии лесничества. Более того, для предотвращения незаконной рубки насаждений каждую модель можно связать с технологией блокчейн, таким образом, фиксируется контроль соответствия леса на корню и его будущего лесопользования. Основная идея заключается в фиксации данных в натуре с его цифровой копией, что позволит верифицировать каждую модель конкретного лесничества.

Поэтапный процесс построения 3-D моделей хвойных древесных растений, с I по VII класс возраста, описывался в работе [202]. У лиственных пород

деревьев шаг класса возраста составляет 10 лет, следовательно, разработка 3-D моделей будет вестись аналогичным образом, где на конечный год класса возраста будет проектироваться отдельная 3-D модель дерева. Здесь справедливо утверждение, что невозможно отобразить всё многообразие биометрических свойств в модели одного дерева на протяжении всего его жизненного цикла. Однако на данный момент в исследовании не стоит задача формирования большого количества разных моделей и их морфологических свойств, основной вектор исследований сосредоточен на развитие технологического процесса разработки самой технологии, построения трёхмерных моделей. При этом, стоит отметить, что в естественных условиях местопроизрастания, и в плантационном лесовыращивании существует определённая единообразная структура древостоев [203, 204], что позволяет сделать вывод о нецелесообразности разработки большого количества различных форм трёхмерных моделей в пределах одного класса возраста.

Одной из задач проектирования 3-D моделей на данном этапе, это установление точных отображаемых морфометрических характеристик дерева в пределах одного класса возраста. В данном исследовании определены две лиственные породы деревьев, которые являются лесообразующими на территории Ленинградской области, это Берёза повислая (*Betula pendula* Roth.) - 31 % от всего состава покрытых лесной растительностью площади и Тополь дрожащий или Осина (*Populus tremula* L.) - 8 %, по данным лесного плана Ленинградской области.

Для реализации моделей будет использоваться графический редактор Blender, однако, можно отметить, что на данный момент существуют открытые 3-D библиотеки разных видов деревьев, где условность этих моделей, отсутствие привязки к территориальным особенностям не позволяет их использование для серьёзного научно-практического применения. В основе процесса моделирования лежит принцип отображения всего покрываемого древесного покрова на занимаемой территории объекта исследования.

Blender - бесплатный пакет для создания 3D-объектов с открытым исходным кодом. Он поддерживает весь спектр необходимых функций для проектирования и работы с 3-D: моделирование, монтаж, анимацию, симуляцию, рендеринг, композитинг и отслеживание движения. Blender предоставляет довольно широкий спектр возможностей для моделирования, рендера и анимации, который не всегда имеется в платных аналогах. Технологии анимации, используемые в программной среде так же полезны для их применения в лесном хозяйстве, для отображения, к примеру, перехода древостоя из одного класса возраста в другой с течением времени. При этом, возможна настройка отображения заданного временного интервала таким образом, где возможно отображение процесса роста древостоя с течением времени на 10, 20, 40 и более лет, ограничения по времени задаются проектировщиком модели.

Для работы с моделями в Blender (и другим программным обеспечением для моделирования) используется формат файлов .obj

Формат файлов OBJ — это простой формат данных, который содержит только 3D геометрию, а именно, позицию каждой вершины, связь координат текстуры с вершиной, нормаль для каждой вершины, а также параметры, которые создают полигоны.

Процесс проектирования 3-d моделей. В основе процедуры процесса проектирования моделей Берёзы повислой (*Betula Pendula* Roth.) использовался аналогичный подход, как и при моделировании хвойных пород [201]. В качестве дополнительных материалов уточняющих характеристики древостоев использовались фотоматериалы, полученные на основе полевых исследований в период 2021 и 2022 года (рис. 35).

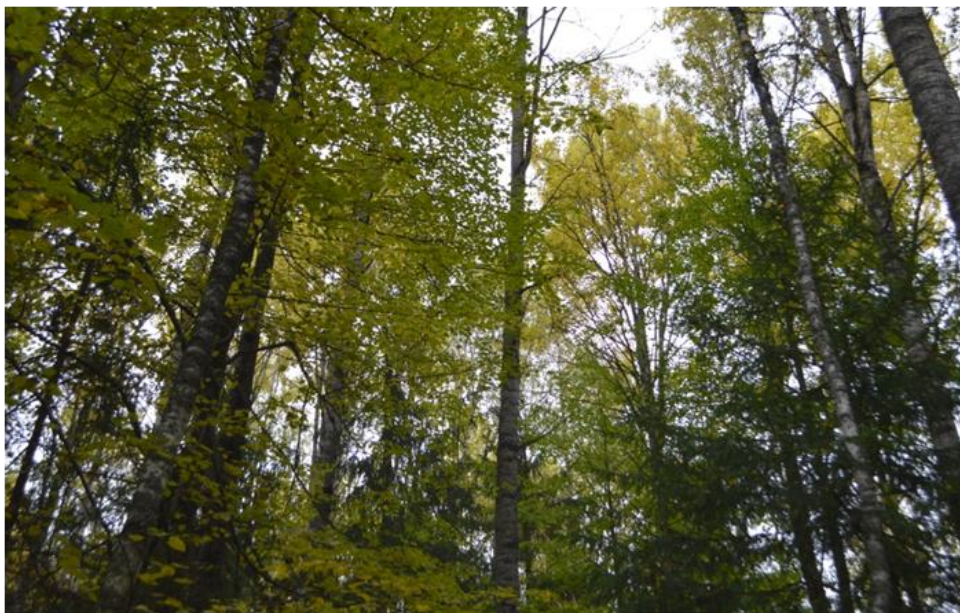


Рис. 35. Выдел в учебно-опытном лесничестве с преимущественным составом Берёзы

Объектом исследования выступал 196 квартал Лисинского учебно-опытного лесничества, где фиксировались основные таксационные показатели каждой моделируемой породы дерева определённого класса возраста. Перед началом исследований были определены лесотаксационные выделы, состав которых определялся в основном чистыми или смешанными насаждениями с преобладанием берёзы и осины. В качестве вспомогательного инструмента для сбора информации был использован беспилотный летательный аппарат DJI Air 2 S официально зарегистрированный в Росавиации (рис. 36).



Рис. 36. Горизонтальный пролет над насаждениями 196 квартала

Дополнительно, для уточнения биометрических свойств были задействованы научные работы [205,206], вспомогательными инструментами так же являлись подборка фотоизображений Берёзы и Осины в условиях произрастания на территории Ленинградской области на разной жизненной стадии. Проведение полевых исследований проходило в весенний, летний и осенний период 2021-2022 года с измерением диаметров стволов у основания и на высоте груди, для получения наиболее точных данных для будущего формирования трехмерной модели конкретного дерева в определённом классе возраста, в насаждении подбирались породы соответствующего класса возраста моделируемому объекту (рис. 37).



Рис. 37. Процесс сбора данных биометрических показателей лиственных лесообразующих пород в учебно-опытном лесничестве

Особенность геопространственного моделирования лесных экосистем состоит в том, что при сборе информации в определённых условиях формируемая геоинформационная модель будет обладать предметно-истинными свойствами самих условий, где произведена фиксация информации. Каждое из определяемых свойств дерева (высота, диаметр, класс крафта) в моделируемой среде можно выделить и вывести посредством интерфейса для отображения, однако для этого требуется отдельный программный продукт, к примеру, геоинформационная система QGIS с подключаемыми к н модулями. Помимо полученных свойств, в модель можно дополнять другими данными, постоянно улучшать информационный состав, вносить изменения, уточнять особенности моделей, такую модель можно охарактеризовать, как интерактивная геоинформационная 3-D модель дерева. По результатам исследования составлена база данных основных биометрических параметров для переноса в геоинформационную модель отдельно по лесообразующим породам.

Для микромодели лесной экосистемы возможно отображение каждого дерева. Формируемые параметры для отображения можно задавать самостоятельно с учётом целевого использования модели. К примеру, для березняков возможно отображение не только их пространственной структуры, но и типа лесорастительных условий, состава подроста и живого напочвенного покрова.

Процесс моделирования лиственных пород делится на 4 этапа (рис. 38). На первом этапе в среде моделирования Blender размещается ствол, затем на основе фотоизображений размечаются ветки и тип ветвлений, после чего системой частиц наносится листва, стоит отметить, что нанесение листвы, в отличие от хвои происходит быстрее, поскольку на отображение фрагментов листвы требуется меньшее количество затрат производительности компьютера. При этом, несмотря на относительно небольшие размеры моделей деревьев с I по II класс возраста, для их детального моделирования и начиная с III класса возраста требуется мощное аппаратное обеспечение, как вычислительной мощности

процессора, так и вспомогательного графического процессора в виде дискретной видеокарты. Важным техническим параметром является объём встроенной видеопамяти, который должен составлять не менее 2 гигабайт. Обусловлено это так же и тем, что в процессе формирования подроста количество таких моделей может достигать несколько тысяч на 1 гектаре.

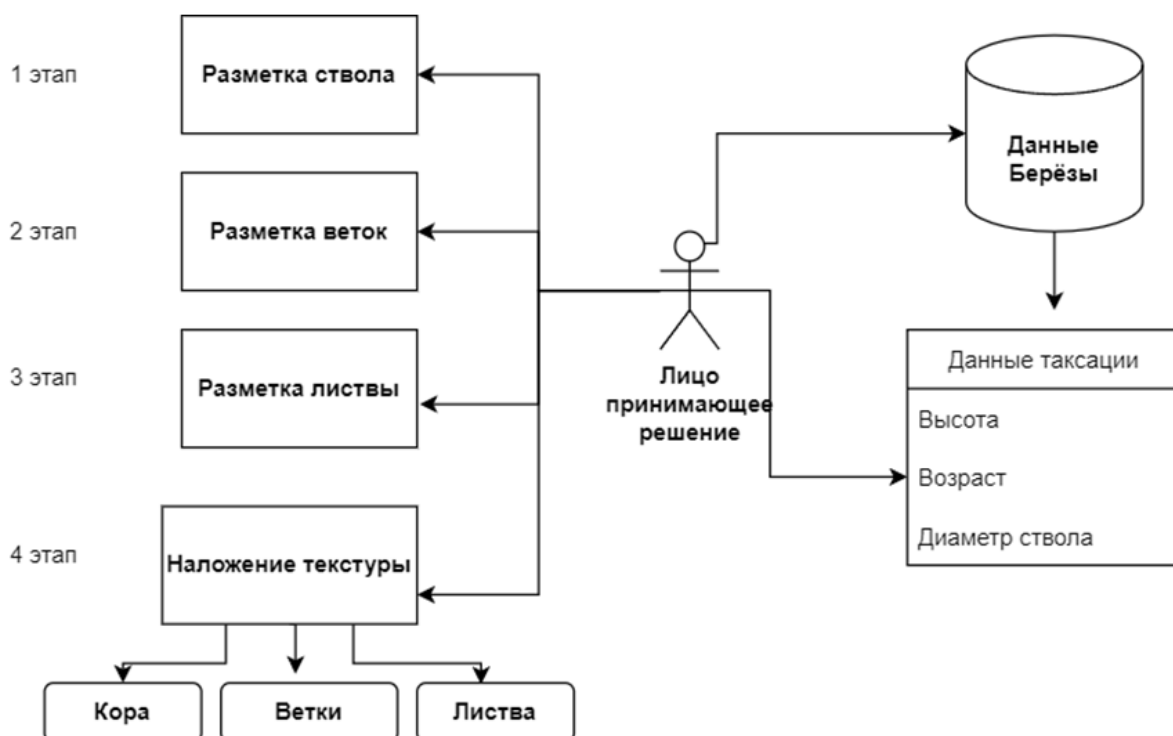


Рис. 38. Общая схема процесса моделирования берёзы

Следующим и заключительным этапом трёхмерного моделирования лиственных пород деревьев является наложение текстур поверх модели дерева, текстуры либо импортируются, либо моделируются вручную. Основная задача заключается в подборе цветовой гаммы, и таких деталей, как особенности структуры коры на разных жизненных стадиях конкретного дерева. К примеру, у берёзы цветовые варианты коры варьируют и меняются с возрастом: от белого цвета, до желтоватого и красновато-бурого. Так же на стволе, как правило, присутствуют продольные линии, которые увеличиваются с возрастом.

В программной среде Blender процесс моделирования представлен на (рис. 39). После формирования каталога древесных растений, возможно, перейти к

процессу размещения растительности в пространстве или к процессу геопространственного проектирования леса. В общем виде данный процесс разделяется на следующие этапы:

- 1) определение территории для моделирования;
- 2) определение типа и масштаба модели;
- 3) определение компонентов моделирования;
- 4) формирование каталогов 3-D объектов конкретных моделей;
- 5) формирование геополя или импорта данных рельефа территории;
- 6) размещение растительности согласно данным дистанционного зондирования Земли.

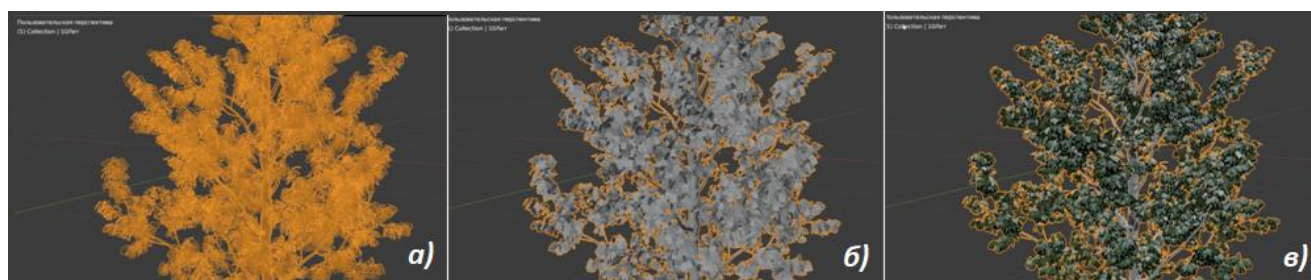


Рис. 39. Отображение основных элементов кроны и структуры верхней части берёзы в процессе моделирования: а) отображение структуры кроны, б) после наложения базового слоя листвы, в) итоговое отображение с включением текстур

Аналогичным образом разрабатывались база данных 3-D моделей на осину (*Populus Tremula* L.). По результатам исследования сформированы основные каталоги 3-D моделей деревьев берёзы и осины Лисинского учебно-опытного лесничества в виде структурированного и упорядоченного набора данных, а также сформирована база данных трёхмерных объектов, подготовлена документация для регистрации базы данных в федеральном органе исполнительной власти по интеллектуальной собственности.

Примеры итогового вида некоторых разработанных моделей представлен на рисунке (рис. 40).



Рис. 40. Трёхмерные модели Берёзы обыкновенной VII классов возраста

Полученные 3-d модели лиственных лесообразующих пород деревьев являются одним из основных элементов для проектирования леса и интеграции трёхмерных моделей на подложку данных дистанционного зондирования Земли, данный этап обозначается как этап комплексирования геопространственной информации. Итоговые высокополигональные модели точной проработки и моделирования отдельных компонент, могут быть интегрированы в состав макро-моделей лесных экосистем и микро-моделей лесных экосистем. Интеграция большого количества трёхмерных моделей лесных экосистем в состав дистанционной модели лесной экосистемы технически реализуема при условии использования высокпроизводительного аппаратного обеспечения и при использовании соответствующего программного обеспечения, но не целесообразна.

В качестве обобщения процедуры построения трёхмерных деревьев возможно описать пошаговый алгоритм, который возможно обозначить как трансформацию полученных исходных данных в цифровую трёхмерную модель дерева, так же можно отметить, два ключевых признака, которые отличают низкополигональную модель дерева от высокополигональной. Первый признак, низкополигональные модели строятся без определения биометрических параметров, второй признак в крупном масштабе отображения дистанционной

одели возможны локальные погрешности и отсутствие моделей с I и II класса насаждений, а так же отсутствие подростa, в виду нецелесообразности данной информации в данном масштабе, однако все типы масштабов и входящие компоненты моделирования должны быть разработаны с соблюдением признаков геоинформационного моделирования и с использованием натурных данных (рис. 41).

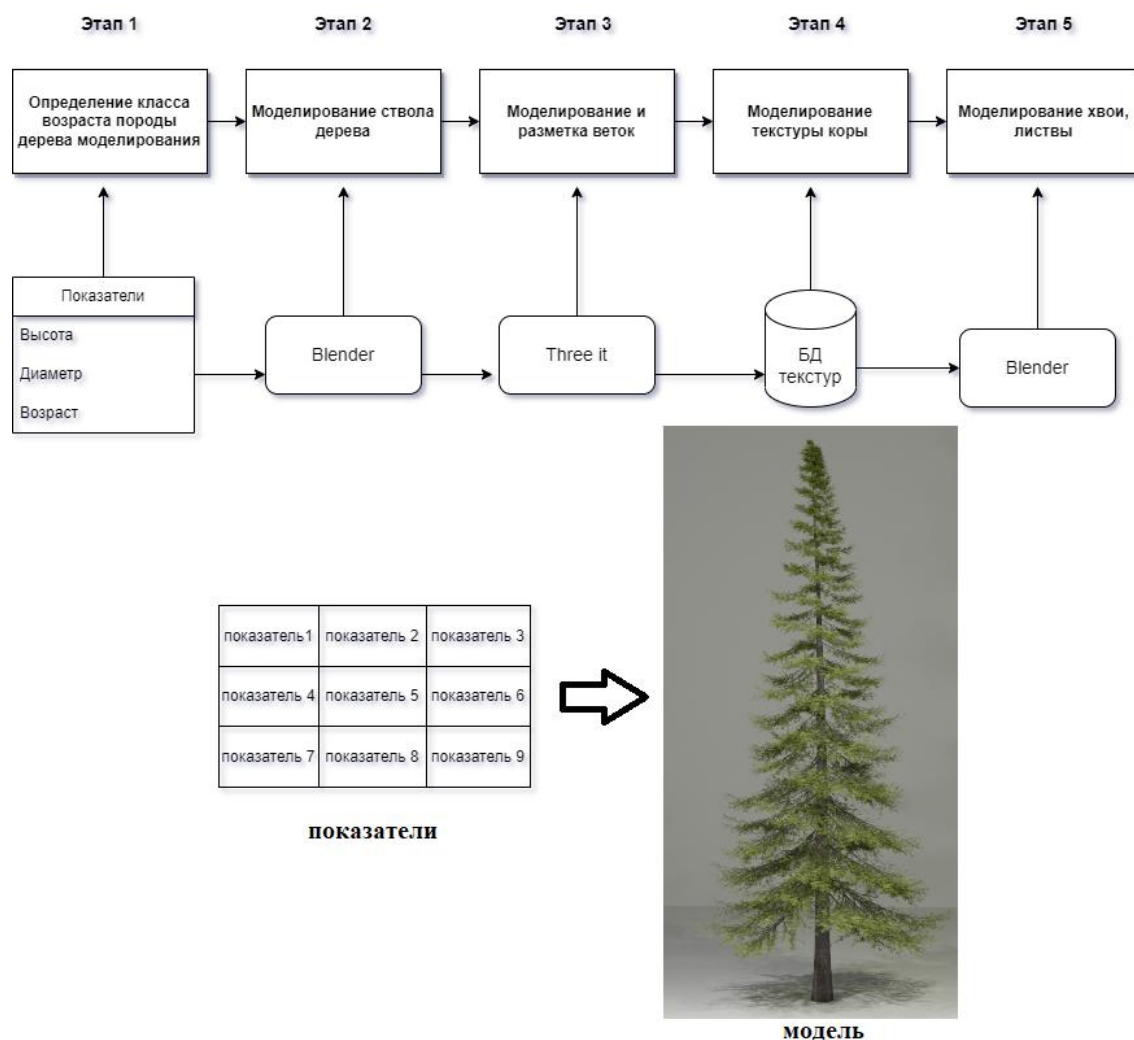


Рис. 41. Алгоритм цифровой трансформации данных в трёхмерную модель на основе полевых данных

Алгоритм цифровой трансформации из одних типов данных в геоинформационную модель может быть реализован не только указанными на (рис. 41), средствами, но и аналогичными выполняющие схожие функции. Цель этапа и получение наиболее точных к естественному виду насаждений.

2.9. Выводы по Главе 2

Процесс разработки отдельных видов деревьев в виде трёхмерных моделей, является сопровождающим элементом общей технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем. После его успешной реализации возможно общая интеграция моделей в среду геоинформационного моделирования, так и полноценное применение в интересах развития лесного сектора различными частными компаниями, специалистами и государственными учреждениями для эффективного управления лесными землями.

Во второй главе диссертации предложена классификация типов геоинформационных моделей лесных экосистем. В качестве масштаба геоинформационного моделирования предлагается использование трёх типов пространственного уровня отображения информации о лесе. Для построения небольших по площади (в пределах 50 метров) участков леса и пробных площадей - микро-модель лесной экосистемы. Для построения средних, занимающих площадь не более одного лесного квартала макро-модель лесной экосистемы и для построения территории леса занимающую площадь более лесного квартала или характеризующаяся крупными ландшафтно-экологическими границами лесов - дистанционная-модель лесной экосистемы.

Разработка трёхмерной базы данных хвойных и лиственных моделей лесообразующих пород, позволит сформировать единый каталог для процесса геопро пространственного проектирования лесной экосистемы на моделируемом участке. В перспективе возможно формирование моделей с шагом в 10 и менее лет, формируя более плавный процесс изменений лесной экосистемы в динамике. По результатам исследований в данной части работы сформированы основные каталоги моделей хвойных пород моделей Сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), Ели обыкновенной (*Picea abies*), Берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.), Тополя дрожащего или Осины (*Populus tremula* L.) на основе полевых исследований учебно-опытного лесничества и оформлены соответствующие свидетельства на регистрации баз данных. Данные каталоги позволят перейти к

полноценному процессу технологии геоинформационного моделирования лесной экосистемы на базе определённого территориального объекта моделирования.

В процессе исследования, компания Intel объявила о готовности к массовому производству квантовых процессоров на кремниевых кубитах, что означает планомерный переход к массовому сегменту внедрения сверхвысокопроизводительных компьютеров [172]. Учёт этого обстоятельства необходим, ввиду важности его понимания, которое свидетельствует о резком и многократном увеличении производительности компьютеров в рамках определённых вычислительных операций. Адаптация таких решений позволит обеспечить применимость описываемых в работе технологий в задачах отображения многоуровневой геоинформации со сложной структурой и повышенными требованиями к визуализации геоданных для лесного комплекса. Квантовые процессы способны обеспечить экспоненциальную производительность для определённых типов операций, что позволяет комплексировать гетерогенную пространственную информацию и визуализировать все типы моделей, планомерно переходящие из одного типа масштаба в другой, при использовании функции мультимасштабирования.

Программирование данного типа операций с использованием квантовых вычислений позволит выполнить указанные действия быстрее, сформировать более точные и реалистичные каталоги древесных и других видов растений. Данные технологии обеспечат формирование более точных компьютерных и геопрограммных моделей, особенно в период климатических изменений, что в перспективе может стать необходимостью для противостояния изменения климатических изменений и формирования высокопродуктивных целевых лесных насаждений депонирующих углерод.

ГЛАВА 3.

ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

Технология геоинформационного моделирования лесной экосистемы состоит из совокупности методик, инструментов геоинформационного обеспечения территорий, набора полученных геоданных, технологического и программного обеспечения, позволяющего проводить процесс моделирования по разработанному методу моделирования [208].

В основе процесса моделирования используется геоинформационное и технологическое обеспечение, на основе выбранного участка моделирования леса, наиболее полные наборы данных создают основу для их системной интеграции в проектируемую модель. При этом разделение на три типа способа представления моделей лесных экосистем обосновано из целевого применения моделей. Основные компоненты, обеспечивающие процесс моделирования это наборы данных и технологическая карта позволяющая ориентироваться на поэтапный процесс разработки модели. Геоинформационное управление природно-техническими системами, на базе геоинформационных моделей представляет особый вид управления, реализующий целенаправленное воздействие на систему с учетом обработки и визуализации пространственно-временных характеристик леса, для формирования у лица принимающего решение наиболее комплексную позицию о состоянии исследуемой покрытой лесом земли. Жизненный цикл древесных растений изучен в достаточной мере для интеграции всех моделируемых процессов в цифровую среду в качестве вспомогательного инструмента управления покрытыми лесом землями [57].

Необходимо отметить, что геоинформационная модель леса – это модель природно-технической системы. Природно-техническая система, представленная в виде модели, должна обладать такими свойствами и инструментами при её использовании, где существует возможность отображения данных моделирования и возможность управления ими. Данный подход позволит

обеспечить новое, комплексное представление основных компонентов лесной экосистемы, для формирования анализа протекающих процессов в лесных экосистемах.

В основе использования принципов геоинформационного моделирования (рис. 40) лесных экосистем заложены:

- данные
- процессы
- инструменты
- технология управления

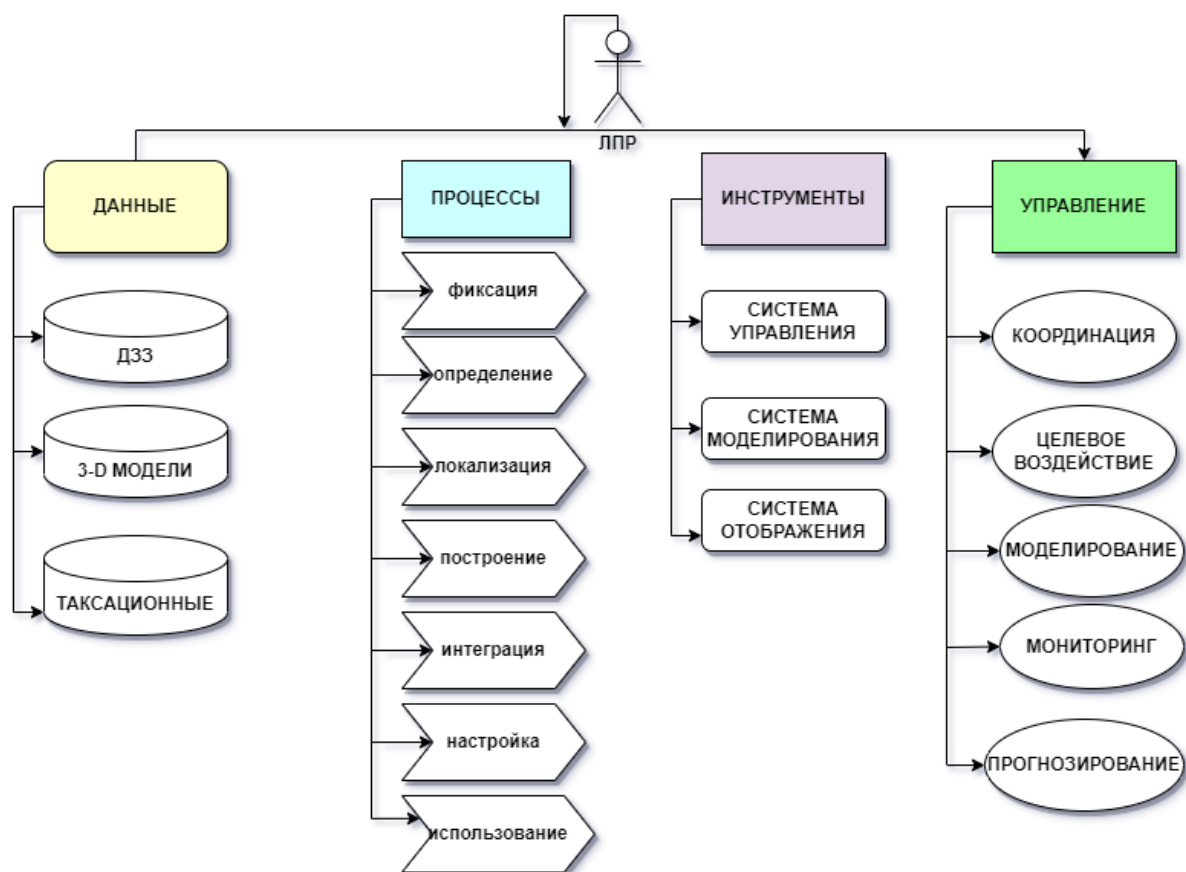


Рис. 42. Технологическая карта основных компонентов метода геоинформационного моделирования

Гетерогенная система данных характеризует состав, структуру, количественных и качественных характеристиках исследуемой лесной экосистемы.

Процессы - основные используемые наборы правил которые выполняет лицо принимающее решение для достижения задачи построения полноценной геоинформационной модели лесной экосистемы

Инструменты - любое программное или физическое обеспечение используемое как в основных системах моделирования, так и вне их.

Управление - целенаправленный процесс воздействия на физическую или цифровую среду с целью удовлетворения поставленной задачи контроля объекта.

Основу построения геоинформационной модели составляют организованные этапы выполнения хода процесса моделирования.

1 этап - процесс получения материалов для формирования сведений о территории для последующего геопространственного проектирования лесов.

2 этап - процесс использования и применения технологического обеспечения по построению геоинформационной модели.

3 этап - процесс интеграции разнородных данных.

4 этап - настройка и отладка процессов работы функционирования геоинформационной модели.

Для определения процесса геопространственного проектирования лесной экосистемы лицом принимающим решение в работе [120] предложено определение данного термина. Геопространственное проектирование лесов – совокупность методов и средств размещения в моделируемой среде древесной растительности, включая как основные лесообразующие породы, так и дополнительные экосистемные компоненты (живой напочвенный покров, породы входящие в нижний ярус насаждений, тип лесорастительных условий). Фактически геопространственное проектирование, это процесс размещения оператором растительности в моделируемой среде, средствами программного обеспечения и на основе полученного опыта, для анализа данных дистанционного зондирования, данный процесс является цепочкой взаимосвязанных действий для достижения основной цели - построения

геоинформационной модели лесной экосистемы. Для построения полноценной модели лесной экосистемы необходимо проектирование не только основных компонентов леса - древесных растений, но и вспомогательных компонентов, именно вспомогательные компоненты придают комплексность модели и обеспечивают её полнотой информации. Чем больше дополнительных, экосистемных компонентов представлено в модели, тем выше информативность данной модели.

Обозначить все вспомогательные компоненты можно отдельно в виде созданной базы данных моделей экосистемных компонентов. Процесс наполнения экосистемными компонентами определяется целевым назначением модели и составом её данных. Для верификации данных в модели в состав геопространственного проектирования должны входить геоданные полученные при помощи средств дистанционного зондирования Земли позволяющие получить сведения о размещении древесной растительности в пространстве.

3.1. Геоинформационное обеспечение технологического процесса моделирования лесной экосистемы

Для реализации первого этапа определим выбранный участок исследования и создания технологии геоинформационного моделирования. В качестве объекта моделирования выбрано Лисинское учебно-опытное лесничество, старейшее в России учебно-опытное лесничество, филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова. Лесничество расположено в Тосненском районе в Ленинградской области (рис. 43).

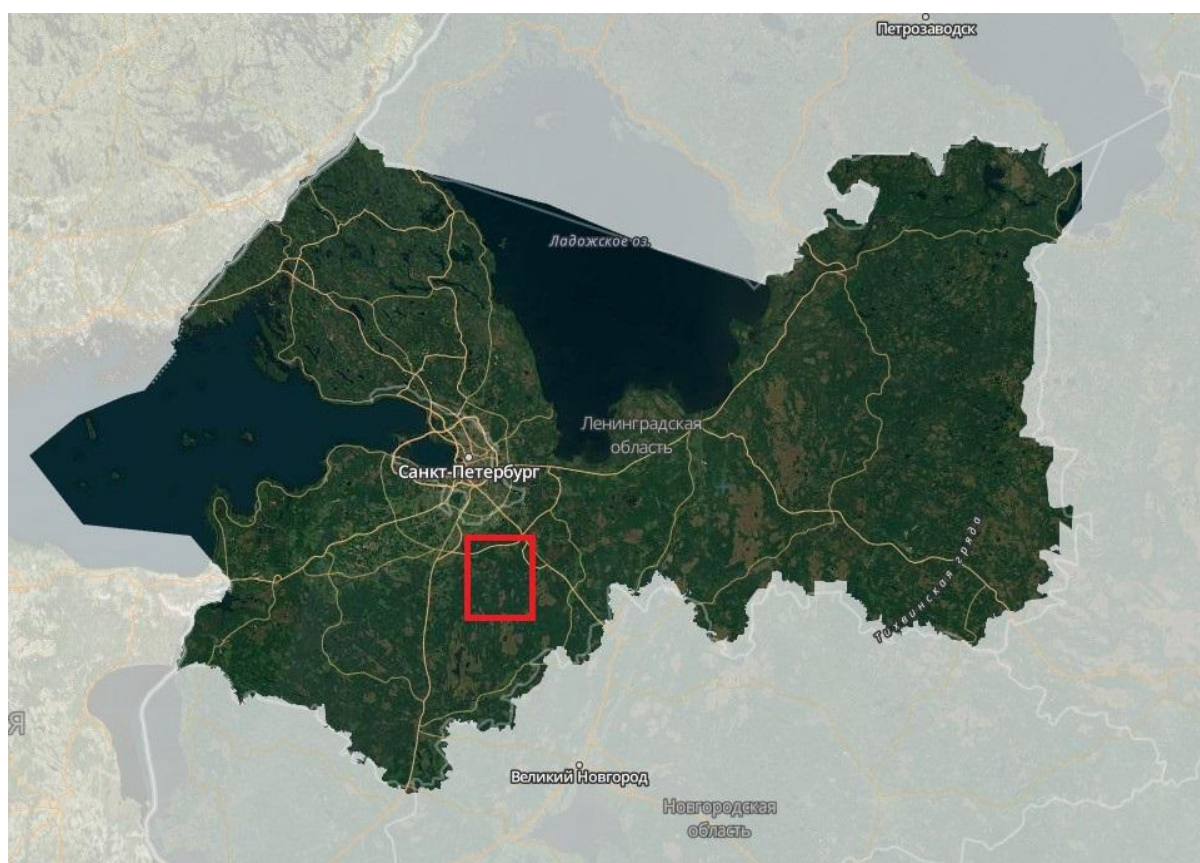


Рис. 43. Учебно-опытное лесничество, расположенное в Тосненском районе, Ленинградской области по данным web-картографического сервиса Леса высокой продуктивной ценности.

Лисинское учебно-опытное лесничество старейшее учебно-опытное лесничество в России, именно в нём проводились передовые опыты по развитию отечественных методов лесного хозяйства [181-185], не исключением должны стать и апробации методов применения информационных и геоинформационных

технологий в лесном хозяйстве на базе учебно-опытного лесничества. Территория лесничества разделена на 3 участковых лесничества: Перинское, Лисинское, Кастенское (рис. 44). Территория лесничества разнообразная по структуре насаждений, в его составе присутствуют все лесообразующие породы Северо-Запада России. Для проведения этапа сбора геоинформации необходимо локализовать наиболее разнообразную по характеристикам административно-территориальную единицу в области управления лесами.

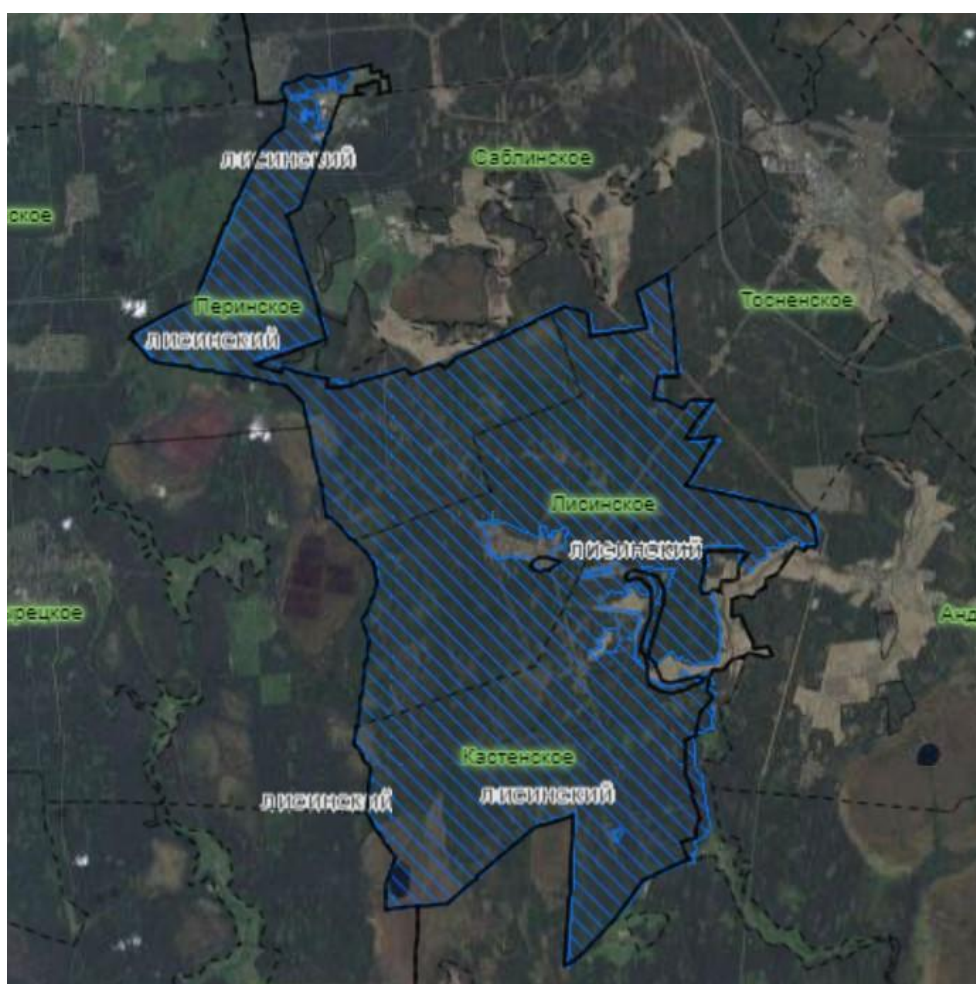


Рис. 44. Расположение лесничества по данным web-картографического сервиса - Леса высокой продуктивной ценности

Этап получения данных посредством геоинформационного обеспечения является основополагающим. От количества и качества полученной информации будет зависеть процесс последующего геомоделирования выбранного участка в лесничестве. В качестве основных типов данных будут использованы

гетерогенные данные, полученные технически разными способами на территорию исследования, среди которых будут использованы:

- открытые материалы web-картографических сервисов;
- данные полученные при помощи беспилотного летательного аппарата;
- фотоматериалы, полученные при помощи фотофиксации в полевых исследованиях.

Открытые материалы web-картографических сервисов позволяют проводить первичный анализ территории, произвести точную фиксацию и местоположение выбранного участка. Функциональное обеспечение web-картографических сервисов позволяет проанализировать видовой состав и наличие различных границ, как природного характера, так и естественного. Инструменты предобработки встроенные в состав web позволяют ускорить процессы первичного анализа территории моделирования. В исследовании используются следующие данные, полученные на базе открытых web-картографических сервисов:

- леса высокой продуктивной ценности (ЛВПЦ) - Всемирного фонда дикой природы (WWF);
- Google Earth Pro - компании Google, снимки 2020-2021 года.

Вторым набором данных геопространственного обеспечения процесса геомоделирования лесной экосистемы выступают данные полученные при помощи беспилотного летательного аппарата. Данные полученные при помощи беспилотного летательного аппарата позволяют получить детальные снимки лесного участка с высоким пространственным разрешением, в данном исследовании использовались два аппарата класса микро компании DJI на четырехроторной платформе (квадрокоптер) под управлением операционной системы Android и встроенного программного и стороннего обеспечения, прошедшего процедуру регистрации воздушного судна в Росавиации.

Детализированные данные, полученные с применением квадрокоптера, позволяют получить наиболее полные сведения об исследуемой местности, получить данные о древесной растительности входящие в II и III ярус насаждений и детали компонентов леса, которые не видны на материалах web-картографических сервисов полученных при помощи орбитальных группировок искусственных спутников Земли. Данные полученные при помощи беспилотного летательного аппарата позволяют получить представление и о составе живого напочвенного покрова и о пологе леса, это достигается методом принудительного снижения аппарата до 1 метра над поверхностью лесного участка, в режиме телеоперационного управления и фотофиксации для получения высококачественной фотографии и облета таксационного выдела под пологом леса.

Однако, технологическая сложность фотофиксации БЛА выражается в большом количестве собранной информации требующей длительного процесса обработки, зачастую собранные данные дублируют информацию, особенно при большой доле перекрытия снимков, с этой точки зрения, перспективными выглядят технологии захвата информации при помощи видеоспектральной съёмки, описанной в научной работе Кириенко А.В., на основе такого типа съёмки возможно обнаруживать отдельно техногенные объекты и природные объекты по разработанным алгоритмам поиска информации [209].

Для постановки экспериментальной части исследования в большей части был использован беспилотный летательный аппарат фирмы DJI, модель Air 2S. Конфигурация входящего в состав используемого квадрокоптера, система датчиков определения расстояний до объектов позволяют избежать в процессе полета столкновения со стволами деревьев, что позволяет использовать аппарат не только на открытом пространстве, но и в лесу, проводить съёмку внутри полога леса. Такой облёт территории возможен только в низкополотных насаждениях с относительной полнотой не более 0,5 (рис. 45).



Рис. 45. Съёмка учебно-опытного лесничества 2021 год

Полевые материалы, полученные при помощи вспомогательной фотофиксирующей аппаратуры необходимы для уточнения характеристик леса и морфологических особенностей древесных пород на заложенных пробных площадях. Полученные данные позволяют обращаться к данным материалам для определения общего вида и состава древостоя, что позволит при разработке геоинформационной модели не только увидеть исследуемый участок изнутри, но и интегрировать данные в состав проектируемой модели, оценить микрорельеф местности.

Квартал моделирования Лисинского учебно-опытного лесничества. Для определения места сбора полевой информации и информации полученными средствами дистанционного зондирования Земли, необходимо определить территориальный объект будущего геоинформационного моделирования лесной экосистемы. В качестве объекта процесса моделирования был определен 196 квартал Лисинского лесничества, критериями выбора послужили:

- географическое расположение и доступность квартала;
- разнообразный и разновозрастный состав насаждений;
- естественное происхождение древесных пород;
- площадь квартала;
- наличие на территории квартала вырубок;
- наличие таксационных данных;

- наличие процессов естественного возобновления лесов после рубок.
- возможность на основе данного квартала моделировать все три типа классифицированных геоинформационных моделей лесных экосистем.



Рис. 46. Расположение 196 квартала на схеме учебно-опытного лесничества

Проведение съёмки лесного квартала при помощи беспилотного летательного аппарата проходило в летний, осенний, зимний и весеннее время в период с 2020 по 2022 год. Обосновано это тем, что в зависимости от периода съёмки, каждый из полученных наборов данных обладает определенными качествами характеризующих геопространственные объекты, которые позволяют взаимодополнять геоинформационное обеспечение процесса моделирования территорий.

Для формирования набора данных на 196 квартал, были сформированы полетные задания в программном обеспечении Litchi. Траектория полёта являлась совокупностью путевых точек ориентированных на получение данных всей лесопокрытой площади квартала (рис. 47, 48).

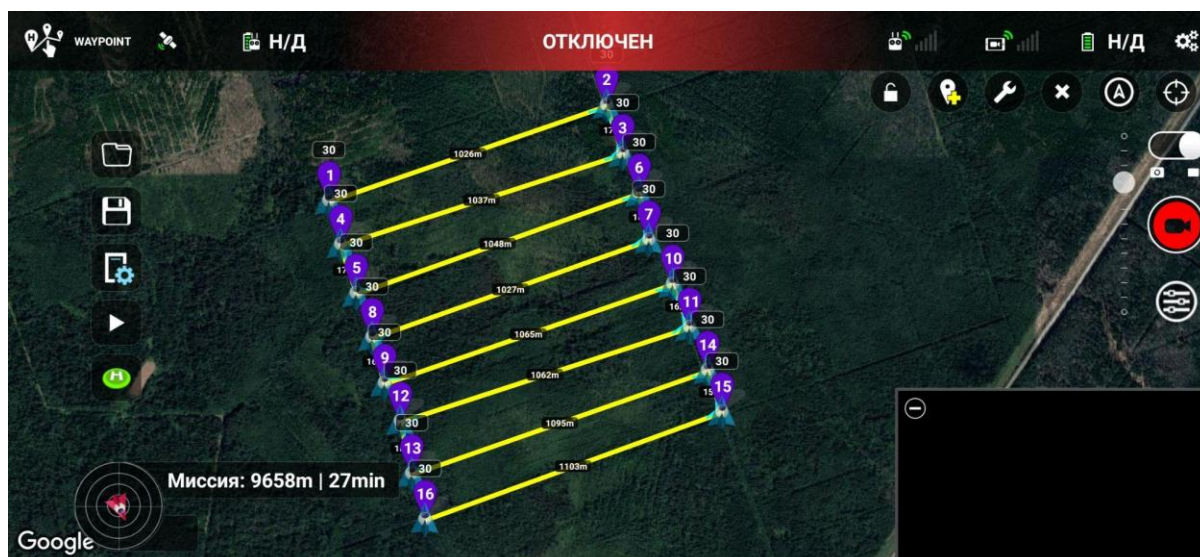


Рис. 47. Полётное задание облёта 196 квартала учебно-опытного лесничества



Рис. 48. Точки захвата фотофиксации и формирования набора геопространственных данных

Так на зимних и весенних снимках полученных весной 2021 года отчётливо видны стволы и структура деревьев (рис. 49). На летних материалах 2021 года видны кроны основных лесобразующих пород хвойных и лиственных деревьев (рис. 50). При этом, на данных материалах отчётливо видны насаждения 2 и 3 яруса, обычно скрытые под пологом леса на спутниковых снимках. Как правило, изображения, используемые от ресурсов web-картографических сервисов, не позволяют увидеть насаждения 2 и 3 яруса насаждений, в виду низкой разрешающей способности материалов, но на

полученных фотоматериалах с беспилотника, они отчётливо просматриваются, что позволяет впоследствии использовать эти данные для более детального геоинформационного моделирования лесной экосистемы.



Рис. 49. Процесс зимней съемки 196 квартала с беспилотного летательного аппарата в 2021 году



Рис. 50. Процесс летней съемки 196 квартала с беспилотного летательного аппарата в 2021 году

Получение материалов дистанционного зондирования Земли лесопокрытой площади средствами БЛА в разные временные периоды интересно не только с технологической точки зрения процесса сбора информации, сформированные наборы геоданных позволяют проанализировать полученные изображения на предмет изменений структуры древесных пород с течением времени. Фактически зимняя съёмка дополняется недостающими сведениями летней съёмки, летняя съёмка уточняет состав насаждений. Большое количество материалов формирует массив данных, в которых содержатся особенности участка моделируемого леса. При необходимости возможно составление ортофотоплана на моделируемую местность.

Особенности насаждений подлежат классификации, что позволит в дальнейшем на её основе перейти к процессу разработки баз данных признаков геомоделирования. Процесс классификации данных призван также, согласовать между собой крупные типы данных (таксационные и растровые), по своей структуре являющимися гетерогенными. Впоследствии необходим механизм интеграции таксационных данных в трёхмерные модели, в таком случае, каждый из организованных наборов данных, будет иметь наборы логических данных и свойства, характеризующие поведение объектов. Дополнить модель динамическими свойствами возможно на основе обучающихся алгоритмов [231-233] или карты поведений [234] жизненного цикла древесных растений, являющейся определённой онтологией раскрывающей внутреннюю организацию лесной экосистемы на описываемом уровне информационного представления.

Предложенные в данной работе в Главе 2 признаки геомоделирования позволяют полноценно верифицировать модель лесной экосистемы для её практического применения.

В работе [210] был предложен метод расчёта густоты лесных насаждений, как одного из важных таксационных показателей, посредством программной обработки полученных снимков. Однако, только количественный учёт насаждений не позволяет всецело анализировать процессы жизненного цикла

лесных экосистем, для полноты сведений и произведения прогнозных процессов необходима точная копия лесного участка его цифровая геоинформационная модель. Фактически такой способ отображения информации является следующим этапом в представлении геопространственных данных лесного хозяйства. Важный аспект в необходимости реализации технологии визуализации лесной экосистемы отмечен государственными органами лесного хозяйства. Для того, что бы ресурсом управлять его необходимо видеть и понимать основную содержательную и смысловую часть физического представления объекта управления, для его эффективного управления. Основной проблемой в лесном хозяйстве является отсутствие периодического и систематизированного обновления материалов таксации насаждений, что не позволяет точно знать количественные и качественные характеристики лесов, отмечают государственные деятели высшего управляющего звена [211].

Впервые в диссертационной работе предлагается альтернативный способ представления информации о состоянии лесных ресурсов, наиболее отвечающий естественному и точному способу отображению информации о лесных экосистемах и возможностям представления геоинформации на разном масштабе её отображения.

3.2. Технологическое обеспечение формирования геопространственных данных для модели

В лесных экосистемах в пространстве и во времени происходят постоянные изменения, которые характеризуются изменением в составе древостоя, изменениями лесной среды, изменения несут как естественный (биотический) характер так и абиотический характер [212]. Геоинформационная модель лесной экосистемы представляет собой композит наборов данных организованных между собой по следующему принципу:

- 1 набор данных - характеристики рельефа местности;

- 2 набор данных - данные дистанционных материалов;
- 3 набор данных – трёхмерные модели деревьев;
- 4 набор данных - таксационные описания, полученные в ходе лесоустройства;
- 5 набор данных - текстурные данные;
- 6 набор данных - информация, описывающая характеристики и поведение растительных объектов на протяжении жизненного цикла.

На каждый из используемых наборов данных, далее в работе будет описана поэтапная методология формирования организации набора данных в виде единой модели, в совокупности все интегрированные данные 196 квартала будут представлять собой геоинформационную модель леса, а процесс разработки модели - технологией геоинформационного моделирования лесной экосистемы.

Технология процесса моделирования заключается в реализации основных этапов и последовательности работ. Среди главных этапов выделяются следующие:

1. Формирование геополя рельефа на базе данных SRTM.
2. Импорт данных рельефа в графическую среду для геопространственного проектирования лесов.
3. Формирование подложки покрытой лесом Земли и создание карты весов.
4. Фиксация точек захвата расположения деревьев в пространстве.
5. Определение породного состава лесов
6. Реализация и наложение первичных 3D моделей деревьев.
7. Совмещение данных дистанционного зондирования и трехмерных объектов.
8. Интеграция таксационных данных в модель.
9. Использование модели.

Технологическое обеспечение реализации модели сопряжено с использованием производительных аппаратных компонентов при

проектировании геоинформационных моделей макро и микро-моделей, обосновано это тем, что для отображения большого объёма информации требуются значительные вычислительные ресурсы для её воспроизведения и рендеринга. В работе для проектирования трёхмерных моделей использовался производительный компьютер с повышенными техническими характеристиками и производительным графическим процессором. В качестве аппаратного компонента проектирования геоинформационных моделей лесных экосистем использовался вычислительный комплекс на базе:

- процессор: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400F 2,50 GHz,
- видеоадаптер: NVIDIA GeForce GTX 1060 3 GB,
- оперативная память: DDR 3 16 GB.

Проектировать геоинформационные модели возможно и с более низкими в плане производительности компьютерами, однако необходимо снизить площадь территории геоинформационного моделирования.

Общая концепция технологии геоинформационного моделирования представлена на схеме (рис. 51), где сформировано три базовых компонента процессы, используемые данные и необходимое обеспечение. Процессы раскрывают этапы формирования функций моделирования территории покрытой лесом, типы данных содержат информацию об основных форматах данных, обеспечение содержит информацию о устройствах и программах используемых для достижения поставленной задачи – формирования геоинформационных моделей лесных экосистем.

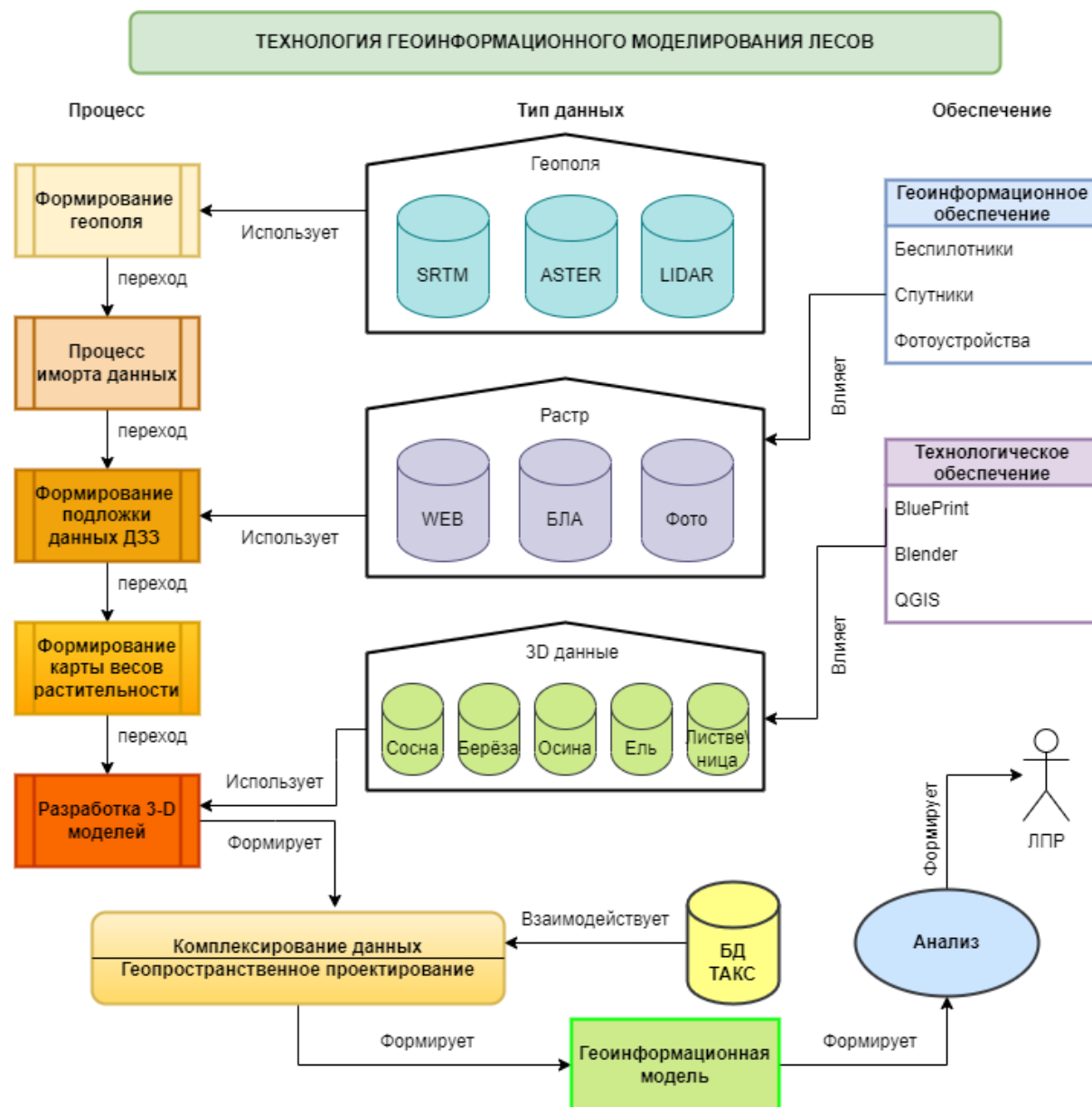


Рис. 51. Общая схема технологии геоинформационного моделирования

В качестве основных программных компонентов проектирования геоинформационных моделей лесных экосистем были использованы следующие:

- среда трёхмерного моделирования –Blender,
- геоинформационная система – QGIS,
- интерфейс прикладного программирования - Web GL,
- среда вычислений - Wolfram Mathematica.

На каждом определённом этапе и в зависимости от масштаба использовалась комбинация программного обеспечения. Однако стоит отметить,

что, не смотря на то, что реализовать итоговую модель возможно как группой программ, так и с помощью использования одной-двух, наиболее оптимальным решением при формировании разных геоинформационных моделей лесных экосистем, будет являться создание единой информационной системы, цель которой - объединение цикла задач требующих использование функций разнородного программного обеспечения.

В качестве данных геопространственного обеспечения определены следующие источники получения информации:

1. Данные дистанционного зондирования Земли на основе спутниковых снимков Google Earth Pro;

2. Программное обеспечение для построения полётного задания с использованием беспилотного летательного аппарата Litchi;

3. Программное обеспечение для формирования трёхмерных моделей лесных экосистем разного масштаба Blender и подключаемый модуль Blender GIS.

В качестве инструмента сбора геопространственной информации выступает беспилотный летательный аппарат DJI AIR 2 S, полученные изображения в ходе проведения съёмки на объект исследования (рис. 52). Такие данные наиболее подходят при использовании их в качестве вспомогательного набора данных при моделировании территории на уровне макро-модели лесной экосистемы и микро-модели лесной экосистемы. Стоит отметить, что для получения информации большой лесопокрытой площади более 100 гектар, рекомендуется использование БЛА самолётного типа, поскольку данные устройства обеспечивают большую площадь фотофиксации поверхности Земли. Однако процесс запуска данных устройств и согласовательные законодательные процедуры сложнее, в отличие от мобильных устройств БЛА типа квадрокоптер.

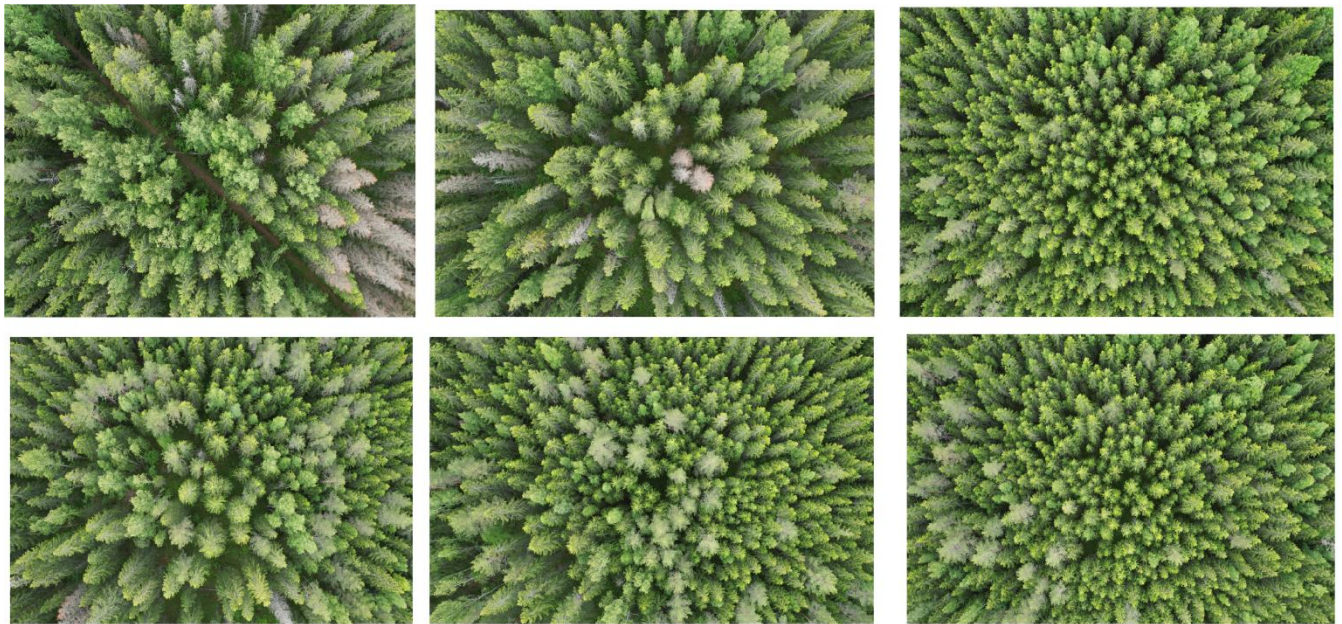


Рис. 52. Серия снимков полученных с БЛА DJI Air 2S

Необходимость проведения съёмки обоснована получением геопространственной информации о структуре насаждений их текущем состоянии, общей оценке видового разнообразия древесных растений и отработки этапа геопространственного обеспечения по циклу сбора информации об объекте исследования. Сбор данных условно делится на 4 этапа: подготовительный, предполетный, полет и обработка данных [309].

Задача данного этапа – оперативное получение сведений о состоянии земель лесного фонда на локальной территории и подготовка данных, для построения геоинформационных моделей с интеграцией данных трёхмерного моделирования насаждений соответствующих в натуре классам возраста породного состава лесных экосистем.

После получения базового набора данных на интересующую местность, возможно, использовать полученные серии снимков или ортофотоплан, в зависимости от масштаба геоинформационного моделирования для наложения фотоматериалов на цифровую модель рельефа и интеграции с объектами моделирования.

Однако в процессе получения информации средствами БЛА существует сложность процесса формирования гладких программных траекторий.

Обусловлено это тем, что при съёмке лесных массивов БЛА самолётным типом в точках поворота БЛА существуют искажения или завалы на полученных снимках, изображения, полученные в местах поворота, отличаются от полученных изображений в местах, где траектория полёта ровная, это может усложнить процесс дешифрирования насаждений и последующего процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем. Для решений искажений на снимках, в данной проблеме предложено следующее решение коррекции программных траекторий БЛА.

Формирование программных траекторий их движение, определяется упорядоченной совокупностью путевых точек $\{P_i, i = 1, \dots, n\}$.

Эти точки, как правило, задаются их географическими координатами: широтой B_i и долготой L_i . При этом программная траектория движения БПЛА интерпретируется, как совокупность фрагментов прямолинейных участков (дуг большого круга), соединяющих между собой точки P_i и P_{i+1} , и может быть представлена в виде:

$$T = \{F_1(P_1, P_2), F_2(P_2, P_3), \dots, F_{n-1}(P_{n-1}, P_n)\} \quad (1)$$

Данная опорная траектория предполагает обследование объекта при полете БПЛА на постоянной высоте и с постоянной скоростью, что позволяет для ее описания использовать совокупность географических координат, которые могут быть сняты с карты и в формате google maps представлены в виде:

```
Waypoint( 1,:) = "59°25'02.2''N 30°40'51.5''E" ;
Waypoint( 2,:) = "59°25'08.7''N 30°40'55.8''E" ;
Waypoint( 3,:) = "59°25'11.7''N 30°41'03.4''E" ;
Waypoint( 4,:) = "59°25'12.5''N 30°41'04.2''E" ;
Waypoint( 5,:) = "59°25'12.8''N 30°41'07.8''E" ;
Waypoint( 6,:) = "59°25'14.1''N 30°41'11.5''E" ;
Waypoint( 7,:) = "59°25'13.6''N 30°41'12.7''E" ;
Waypoint( 8,:) = "59°25'12.7''N 30°41'13.5''E" ;
Waypoint( 9,:) = "59°25'13.0''N 30°41'15.2''E" ;
```

```

Waypoint(10,:) = "59°25'13.9''N 30°41'16.4''E" ;
Waypoint(11,:) = "59°25'14.3''N 30°41'17.5''E" ;
Waypoint(12,:) = "59°25'14.2''N 30°41'18.6''E" ;
Waypoint(13,:) = "59°25'13.7''N 30°41'19.5''E" ;
Waypoint(14,:) = "59°25'12.9''N 30°41'19.5''E" ;
Waypoint(15,:) = "59°25'12.3''N 30°41'20.6''E" ;
Waypoint(16,:) = "59°25'12.3''N 30°41'22.3''E" ;
Waypoint(17,:) = "59°25'12.7''N 30°41'23.9''E" ;

```

Однако, движение по такой траектории возможно только для небольших аппаратов, типа квадрокоптера, а реальные БПЛА самолетного типа обладают инерционностью движения и ограниченной управляемостью, что не позволяет им резко менять траекторию движения в случае постановки задачи построения специфического полётного задания, исходя из географических особенностей местности. На рис. 53 представлены различные процессы движения БЛА при разных радиусах циркуляции.

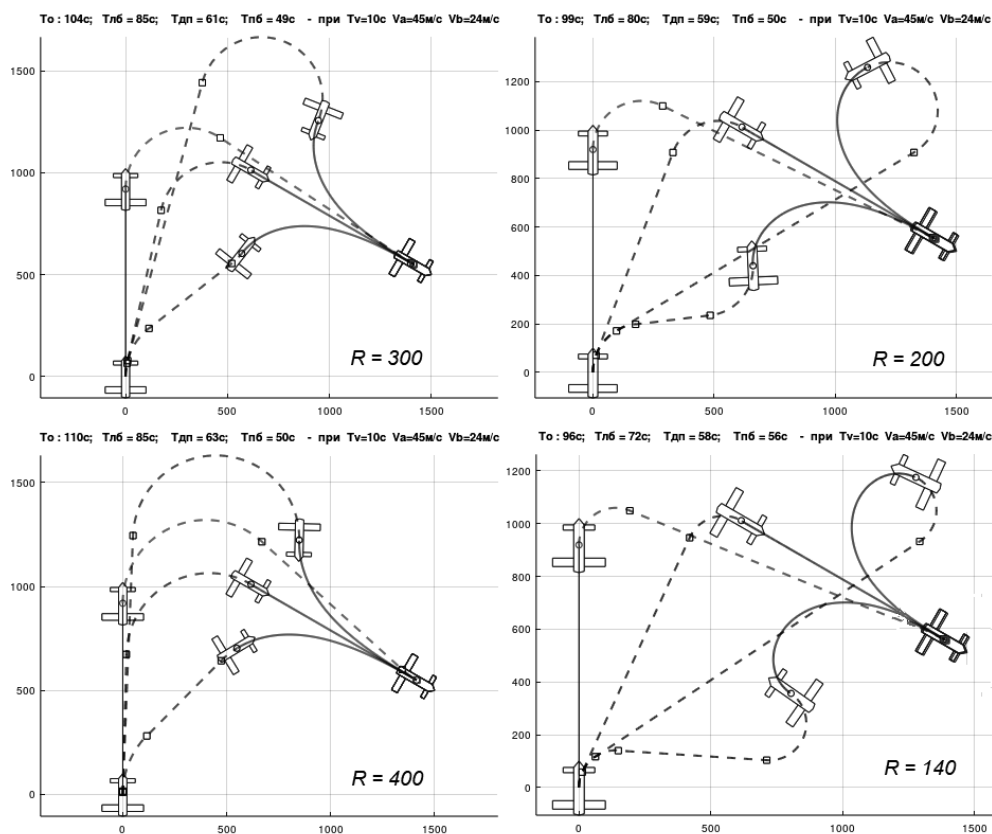


Рис. 53. Процесс движения БПЛА при разных радиусах циркуляции.

Данное обстоятельство приводит к необходимости решения задачи по обеспечению в точках P_i гладкого сопряжения двух фрагментов траектории F_i и F_{i+1} с учетом динамических характеристик объекта, которые упрощенно можно описать максимально допустимыми угловыми скоростями движения или минимально возможными радиусами поворота БПЛА. Для решения данной задачи целесообразно выражение (1) представить в виде:

$$T = \{S_1^0(F_{1p}, P_2, F_{2q}), S_2^0(F_{2p}, P_3, F_{3q}), \dots, S_{n-2}^0(F_{(n-2)p}, P_{n-1}, F_{n-1})\} \quad (2)$$

В этом случае опорная траектория движения представляется совокупностью из $(n-2)$ сегментов вида S_i^0 , каждый из которых включает в себя по два фрагмента траекторий и точку их сопряжения. Однако, чтобы такие сегменты были динамически реализуемы исследовательскими объектами, надо вместо точки сопряжения использовать гладкую кривую сопряжения в виде заданного или допустимого радиуса поворота (циркуляции). С этой целью каждый из сегментов опорной траектории движения вида

$$S_i^0 = f(F_i(P_i, P_{i+1}), P_{i+1}, F_{i+1}(P_{i+1}, P_{i+2})) \quad (3)$$

требуется преобразовать к виду

$$S_i^1 = f(F_i(P_i, a_i^x), R_i, F_{i+1}(c_i^0, P_{i+2})) \quad (4)$$

при котором каждый сегмент трактуется, как часть первого фрагмента траектории этого сегмента от точки P_i до точки a_i^x , где осуществляется переход на движение по заданному радиусу, которое продолжается до точки c_i^0 – точки продолжения движения по второму фрагменту траектории данного сегмента.

Таким образом, исходная задача сводится к поиску на каждом фрагменте траектории F_i координат точки $[B_a^i, L_a^i]$, где осуществляется переход на движение по кругу радиуса R_i , которое должно закончиться в точке $[B_c^{i+1}, L_c^{i+1}]$, принадлежащей F_{i+1} фрагменту траектории.

Для решения данной задачи предлагается использовать алгоритм, в котором на каждом k шаге из исходного множества путевых точек выбирается текущий базовый сегмент траектории S_k^0 , описываемый тремя путевыми точками a_k, b_k, c_k , которые являются полным аналогом точек P_i, P_{i+1}, P_{i+2} .

До момента начала работы основного цикла алгоритма возникает необходимость в преобразовании значений путевых точек, заданных в текстовом формате google maps, в числовой формат отображения географических координат. В результате выполнения этого преобразования из текстового google maps формата в числовой формат, координаты трех точек, характеризующих первый сегмент опорной траектории, будут иметь следующие значения:

$$P_1 = a_1 = [B_1, L_1] = [59.417278, 30.680972],$$

$$P_2 = b_1 = [B_2, L_2] = [59.419083, 30.682167],$$

$$P_3 = c_1 = [B_3, L_3] = [59.419917, 30.684278].$$

Наличие этих координат, в предположении, что на фрагментах траекторий $\overrightarrow{a_1b_1}$ и $\overrightarrow{b_1c_1}$ движение осуществляется по ортодромии, позволяет вычислить начальные (K_{ab}^H, K_{bc}^H) и конечные (K_{ab}^k, K_{bc}^k) курсовые углы на этих участках. Кроме этого появляется возможность вычислить также и центральные углы $(\sigma_{ab}, \sigma_{bc})$ на участках этих траекторий. Применительно к первому сегменту эти углы будут иметь следующие, выраженные в радианах, значения:

$$\sigma_{ab} = 0.0019051$$

$$\sigma_{bc} = 0.0013594$$

Особенность этих углов в том, что они позволяют при необходимости найти расстояние по большому кругу между точками a_1, b_1 и b_1, c_1 , то есть вычислить значения $S_{ab} = \sigma_{ab} * R_z$ и $S_{bc} = \sigma_{bc} * R_z$, где R_z – предполагаемый радиус Земли, при условии, что σ_{ij} выражено в радианах. При этом, используя средний

радиус Земли ($R_Z \approx 6371\text{км}$), можно получать расстояния S_{ij} , значения которых лежат в пределах 1% от геодезического расстояния для эллипсоида WGS-84.

Таблица 6 Основные параметры первого сегмента траектории

Широта	Долгота	Система	Начальный азимут, Кн	Конечный азимут, Кк	Расстояние в м
$\overrightarrow{a_1b_1}$					
59°25'02.2" N	30°40'51.5" E	WGS-84	18.6313757	18.6324040	212.2679
59°25'08.7" N	30°40'55.8" E	SK-42	18.6313714	18.6323997	212.2715
		Сфера	18.6011634	18.6021917	212.0724
$\overrightarrow{b_1c_1}$					
59°25'08.7" N	30°40'55.8" E	WGS-84	52.2396329	52.2414504	151.6055
59°25'11.7" N	30°41'03.4" E	SK-42	52.2396260	52.2414435	151.6080
		Сфера	52.1912802	52.1930977	151.3279
$\overrightarrow{a_1c_1}$					
59°25'02.2" N	30°40'51.5" E	WGS-84	32.5528632	32.5557089	348.7777
59°25'11.7" N	30°41'03.4" E	SK-42	32.5528567	32.5557025	348.7835
		Сфера	32.5075870	32.5104327	348.3426

Приведенный в (табл. 6) анализ основных характеристик первого сегмента показывает возможность использования сферической системы, когда путевые точки находятся в радиусе до 1км от точки b_1 , и она вполне удовлетворяет точности построения опорных траекторий для рассматриваемого класса БПЛА.

При этом наряду с уже полученными значениями ряда параметров можно вычислить и значение $\sigma_{ac} = 0.0031292$. Это означает, что будут известны все три стороны сферического треугольника ab_1c_1 , что позволяет найти угол между сопрягаемыми участками траектории, т. е. угол между $\overrightarrow{a_1b_1}$ и $\overrightarrow{b_1c_1}$ [6]:

$$\beta_{abc} = \arccos\left(\frac{\cos\sigma_{ac} - \cos\sigma_{bc} * \cos\sigma_{ab}}{\sin\sigma_{bc} * \sin\sigma_{ab}}\right) = 146.41^\circ \quad (5)$$

Как показали исследования, при малых радиусах циркуляции ($R \approx 50 \div 100$ м) задачу сопряжения участков траектории можно рассматривать на плоскости, если S_{ab} и S_{bc} меньше $\square 5R$. В иных случаях, потребуется для обоих участков траекторий $\overrightarrow{a_1b_1}$ и $\overrightarrow{b_1c_1}$ вычислить значения нескольких путевых точек, и в качестве новых базовых для a_1 и b_1 выбрать те, которые отвечают указанному ограничению. В первом сегменте траектории эти условия выполняются, но для общности изложения алгоритма выполним на $\overrightarrow{a_1b_1}$ и $\overrightarrow{b_1c_1}$ поиск, например, по пять путевых точек и расчет путевых углов в каждой из них в (табл.7).

Таблица 7 Расчет путевых углов в каждой путевой точке

Участок траектории $\overrightarrow{a_1b_1}$			Участок траектории $\overrightarrow{b_1c_1}$		
Широта	Долгота	Путевой угол	Широта	Долгота	Путевой угол
59.417278	30.680972	18.601163	59.419083	30.682167	52.191280
59.417729	30.681271	18.601420	59.419292	30.682694	52.191735
59.418181	30.681569	18.601678	59.419500	30.683222	52.192189
59.418632	30.681868	18.601935	59.419708	30.683750	52.192643
59.419083	30.682167	18.602192	59.419917	30.684278	52.193098

Все эти точки удовлетворяют указанным ранее условиям. Они могут быть использованы для их преобразования из геодезической системы координат в прямоугольную. А также при построении фрагмента земной поверхности с центром координат в точке b_1 . Именно в ее окрестности и требуется выполнить гладкое сопряжение участков траекторий $\overrightarrow{a_1b_1}$ и $\overrightarrow{b_1c_1}$ (рис. 54).

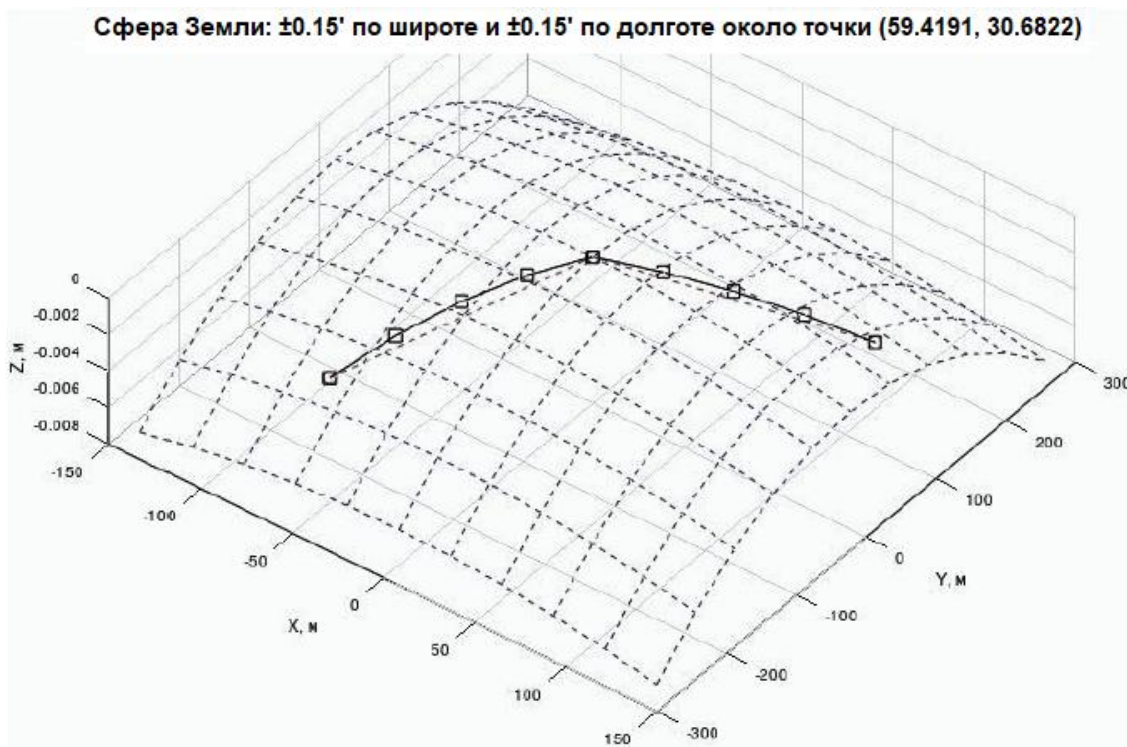


Рис. 54. Фрагмент земной поверхности шириной $\pm 0.15'$ в окрестности точки b_1 .

Как видно на (рис. 54) кривизна сферической поверхности Земли в области сопряжения участков первого сегмента опорной траектории не превосходит и нескольких сантиметров. Это позволяет для БПЛА мониторинга лесных территорий и экологической обстановки, не очень требовательного к точности отслеживания траекторий, перейти к решению поставленной задачи на плоскости.

На данном этапе исходная задача может быть сформулирована, как требование вписать окружность радиуса R в угол $\beta_{abc} = 146.41^\circ$. При этом для упрощения алгоритма поиска, как точек сопряжения, так и центра окружности, представляется целесообразным выполнить ряд формальных преобразований координат.

В частности, предлагается повернуть весь сегмент траектории так, чтобы его фрагмент $\overrightarrow{a_1 b_1}$ совпадал с положительной частью горизонтальной оси. Эти

достаточно простые, чисто геометрические преобразования, иллюстрируют графики, представленные на рис. 3. Ось ординат соответствует направлению на север, ось абсцисс — на восток, а масштаб осей представлен в метрах.

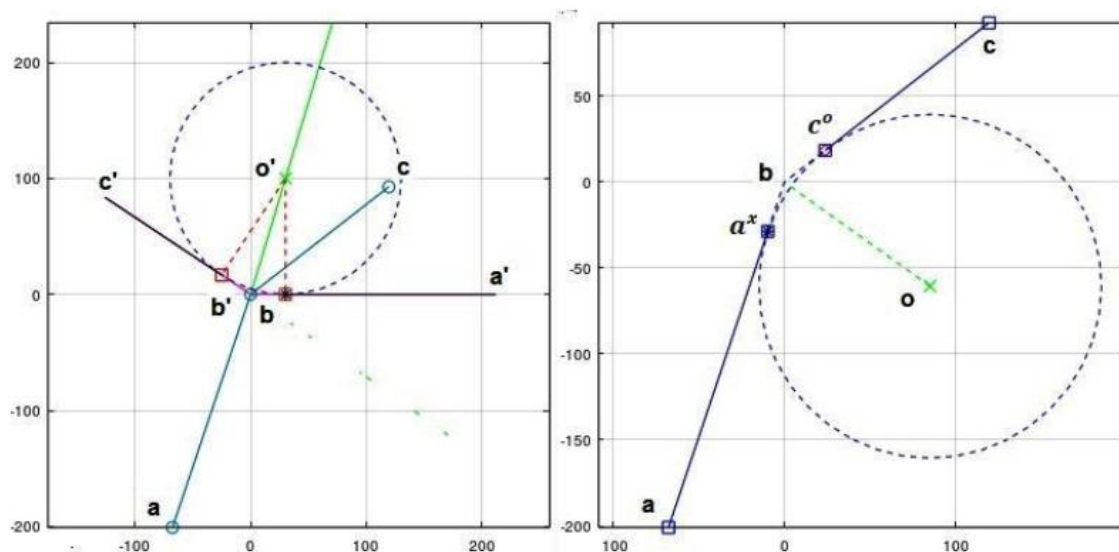


Рис. 55. Прямое и обратное преобразование координат при поиске точек сопряжения.

При этом, как показали расчеты для первого сегмента, на котором в отличие от всех других для иллюстрации был выбран $R=100\text{м}$, центр окружности будет находиться в точке $o = [85.1479, -60.5042]$, а точками сопряжения этой окружности с фрагментами траекторий $\overrightarrow{a_1b_1}$ и $\overrightarrow{b_1c_1}$ будут точки:

$$a_1^x = [-9.6277, 28.6046],$$

$$c_1^0 = [23.8452, 18.5020].$$

Следует особо отметить, что на каждом из участков траектории расстояние от точки b до точек сопряжения с окружностью будет одинаковым и равным

$$\left| \overrightarrow{b_1 a_1^x} \right| = \left| \overrightarrow{b_1 c_1^0} \right| = R * \text{ctg}(\beta / 2) \quad (6)$$

Это позволяет при обратном переходе из прямоугольной системы координат в геодезическую систему координат точки сопряжения определять как

точки на ортодромиях $\overrightarrow{a_1b_1}$ и $\overrightarrow{b_1c_1}$, отстоящие от точки b_1 на величину, определяемую выражением (6).

При задании допустимого радиуса циркуляции конкретного БПЛА, равным 50 метрам, обратные преобразования систем координат позволяют получить расчетную опорную траекторию первого сегмента. А после выполнения всех шагов итеративного процесса сформировать и полную траекторию движения БПЛА с учетом ограничений на его динамические характеристики (рис. 54). Результатом работы алгоритма является список путевых точек, в которых при движении на прямолинейных участках траектории требуется перейти на циркуляцию, а при движении по циркуляции снять управление.

Таким образом, при использовании БЛА самолётного типа для формирования данных геоинформационного моделирования использование данного алгоритма, более гладкой программной траектории повышает качество собранной информации, поскольку обеспечивает стабильный ход и меньший угол крена БЛА. В случае использования БЛА типа мультикоптер, для сбора геоданных, систему стабилизации от поворотов обеспечивает подвес камеры, однако необходимо отметить, что площадь охвата, скорость и время полёта у БЛА типа мультикоптер намного ниже, в отличие от БЛА самолётного типа. Тем не менее, для оперативного получения геоданных и сбора информации менее 100 гектар, БЛА типа квадрокоптер надёжно зарекомендовали себя, о чём свидетельствуют научные работы авторов [313-316].

3.3. Формирование данных рельефа для геоинформационного моделирования лесной экосистемы.

Согласно научной школе лесного ландшафтоведения профессора Киреева Д.М., рельеф является литогенной основой природно-территориального комплекса [213]. Для технологии геоинформационного моделирования формирование рельефа является второй стадией общего процесса моделирования территории, поскольку от его формы зависит расположение и характерные особенности состояния древостоя на занимаемой территории. В диссертации Черниховского Д. М. [174] указано о связи морфометрических характеристик рельефа со структурой лесных насаждений, что позволяет обозначить процесс моделирования лесной экосистемы в комплексе с моделированием рельефа и последующего комплексного компьютерного моделирования ряда совокупностей географических данных, как внешних компонентов лесных экосистем, так и внутренних.

На основании вышеобозначенного, требуется изначально подготовить геополе моделируемой поверхности как основу, на которую в дальнейшем будет произведен процесс импорта и комплексирования, данных дистанционного зондирования и впоследствии произведено размещение трёхмерных моделей древесных пород.

В качестве данных моделирования рельефа для дистанционной и макро модели предлагается использование набора данных SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Анализируя структуру данных SRTM (файл тайла) на Лисинское учебно-опытное лесничество, можно сделать вывод, что расположено оно на ровной поверхности в пределах крупного масштаба моделирования (см. рис. 44), это позволяет упростить процесс моделирования геополя для дистанционной модели леса на 196 квартал в масштабе 1: 20 000. Однако, стоит учесть, что полевые наблюдения моделируемого квартала выявили наличие сложной структуры микрорельефа территории. По-этому, технологическое описание процедуры

моделирования рельефа зависит от масштаба проектируемой модели и типа моделируемой геоинформационной модели определённых в Главе 2. Для начала рассмотрим процесс построения основополагающего слоя рельефа для дистанционной модели лесной экосистемы. Разработка процесса проектирования микрорельефа в геоинформационных модели требуется только тогда, когда необходимо более детальное описание окружения лесной экосистемы при исследовании локальных единицы участка леса, например закладке пробных площадей.

Процесс построения модели будет реализован посредством технологии WebGL. WebGL - это специализированная технология отображения графических данных посредством реализации интерфейса прикладного программирования (API). Разработка отображения рельефа местности предлагается в несколько этапов, это как получение общего вида геополя, так и моделирование поверхности структуры микрорельефа пробных площадей в таксационных выделах. Следует отметить, что данные SRTM поставляются участками размером 5 градусов по широте и долготе (5x5-tile). Таким образом, всё пространство по долготе (от -180 до +180) разбито на 72 участка (360/5) [215].

Стоит отметить, что данный процесс моделирования поверхности рельефа может быть выполнен аналогичными программными технологиями предоставляющим доступ к сетке высот земной поверхности. Важно на данном этапе моделирования не технологический способ моделирования рельефа, а итоговые данные, которые станут основой для последующего процесса геоинформационного моделирования. Вместе с тем, в работе будет использоваться именно данный подход, поскольку в работах авторов указывается [215] перспективность и преимущество использования данных SRTM и визуализацию на основе технологии WebGL. Данная технология нашла своё применение и в смежных областях, где объектами моделирования выступают объекты реального мира [217-220].

Очевидные преимущества использования данного подхода воспроизведения геополей:

- исключается использование вспомогательных программ (например, ГИС).
- не требуется промежуточная стадия импорта данных, которая обычно выполняется вручную и поэтому воспроизведение графики происходит в реальном масштабе времени (online);
- задача решается исключительно средствами WEB;
- технология легко интегрируется с такими мощными инструментами, как Google карты.

Общий алгоритм получения рельефа с использованием компонентов WebGL представлен на (рис. 56).

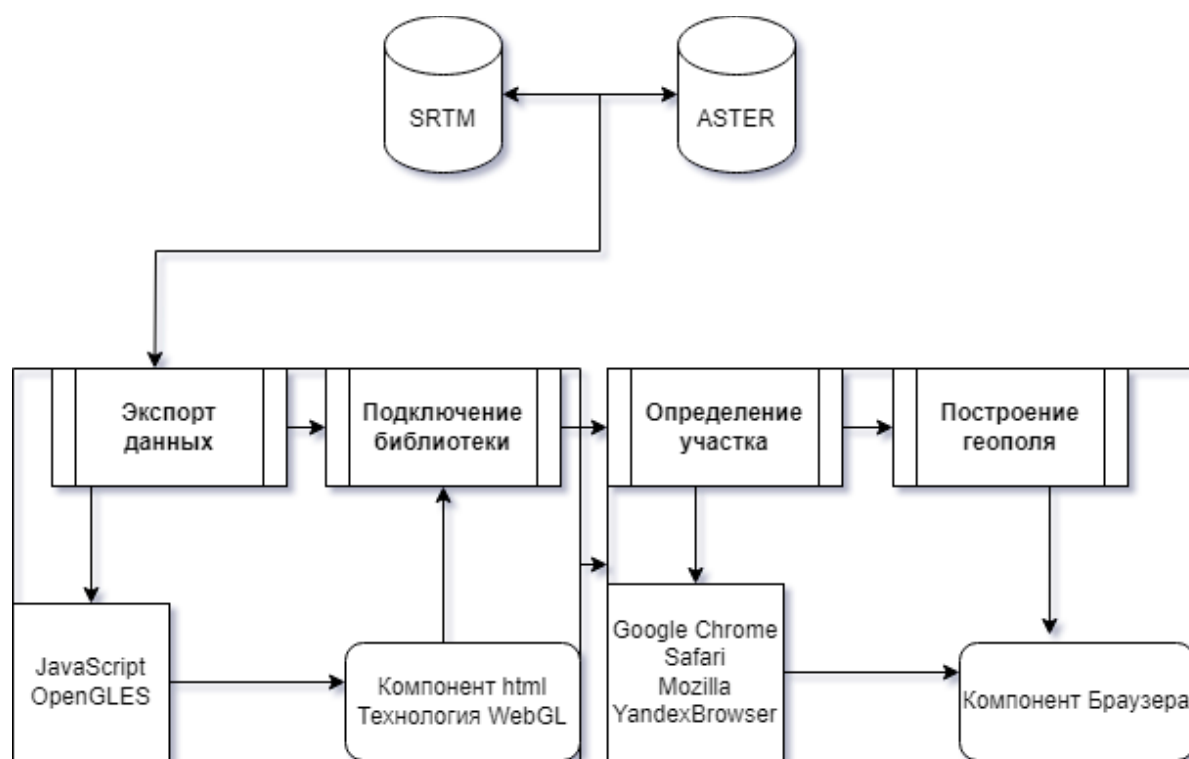


Рис. 56. Общая схема получения геополя выбранного фрагмента земной поверхности.

Возможен также иной подход, который предполагает предварительную интерполяцию по заданным точкам сетки с целью получения гладкой поверхности с непрерывной нормалью в каждой точке. Предварительное сглаживание возможно, например, с помощью классических составных

поверхностей Фергюсона (фактически это вариант двумерной сплайн-интерполяции).

Поскольку WebGL работает только с треугольниками, то после любого варианта построения гладкой поверхности всё равно потребуется триангуляция, которую можно назвать триангуляцией по гладкой поверхности. Триангуляция может быть выбрана достаточно мелкой, с тем чтобы грани визуально не были заметны. Без сглаживания, то есть для естественной триангуляции можно ожидать такого эффекта только при достаточно большом размере сетки, а значит и треугольных граней. Другое преимущество сглаживания — это однозначное определение нормалей в вершинах треугольных граней.

Таким образом, предварительно строится гладкая поверхность $z = f(x, y)$ — результат решения следующей интерполяционной задачи:

$$\begin{cases} f(x_{ij}, y_{ij}) = z_{ij}, \\ x_{ij} = d_i + h_i j, y_{ij} = -h_y i, \\ i = 0, 1, \dots, m-1; j = 0, 1, \dots, n-1 \end{cases}$$

Гладкая поверхность $f(x, y)$ позволяет построить более мелкую сетку размером $M > m$ на $N > n$. Новую сетку можно пересчитать из тех же самых соображений пропорциональности, которые были представлены для естественной триангуляции. Обозначим через $\delta_i, (i = 0, 1, \dots, M-1)$ новое значение шага в рядах. Пересчитаем значение ε , то есть:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{M-1} - \delta_0}{M-1} = \frac{(n-1)(h_{m-1} - h_0)}{(N-1)(M-1)}$$

Величину шага в i -ом ряду рассчитываем по универсальной формуле (такой же, как и для естественной триангуляции):

$$\begin{cases} \delta_i = \delta_0 + i\varepsilon, i = 0, 1, \dots, M-1 \\ \delta_0 = \frac{h_0(n-1)}{N-1} \end{cases}$$

Пересчитываем сдвиги в рядах:

$$D_i = \frac{\varepsilon(N-1)(M-1-i)}{2}, (i = 0, \dots, M-1)$$

Шаг по оси y остаётся постоянным и пересчитывается следующим образом:

$$\delta_y = \frac{h_y(m-1)}{M-1}$$

Для расчета координат вертексов новой сетки:

$$\begin{aligned}x_{ij} &= D_i + \delta_x j, \\y_{ij} &\equiv y_i = -\delta_y i, \\z_{ij} &= f(x_{ij}, y_i)\end{aligned}$$

Нормали рассчитываются по-другому:

$$n_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x_{ij}, y_{ij})}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x_{ij}, y_{ij})}{\partial y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Буфер вертексов и нормалей WebGL можно сформировать аналогичным образом, также как и для естественной триангуляции. Однако благодаря тому, что теперь нормали в вершинах определяются однозначно, можно избежать дублирования координат вертексов для каждого треугольника, а воспользоваться механизмом индексации вертексов.

Механизм индексации WebGL позволяет сформировать буфер без дублирования вершин, а порядок формирования треугольников указать в другом буфере с помощью индексов (номеров) вершин. Поскольку индексы — целые числа, которые в памяти занимают меньше места, чем координаты — числа с плавающей запятой, то возможна экономия памяти.

Индексация невозможна в случае естественной триангуляции. Для нормалей формируется отдельный буфер, который строго соответствует буферу вершин (вертексов): каждой тройке координат в буфере вершин соответствует тройка координат в буфере нормалей. По этой причине общие вершины приходится дублировать в строгом соответствии с количеством граней, нормали которых различаются [215].

Поскольку ландшафтно-морфологические характеристики рельефа по данным SRTM на 196 квартал являются относительно ровным плато на площади 122,2 гектара, без резких перепадов высот (рис. 57 а), это упрощает процесс моделирования поверхности для дистанционной модели лесной экосистемы. Однако при моделировании например местности с характерными особенностями рельефа на которых произрастают леса, например гористый ландшафт в Бугульминско-Белебеевской возвышенности (рис. 54 б), требуется процедура предварительного сглаживания поверхности. Предварительное сглаживание предполагает гладкую интерполяцию, обеспечивающую непрерывность нормали, по заданным точкам сетки. В результате возможна более подробная триангуляция, которая строится по вычисленным точкам интерполированной поверхности. Для предложенных двух подходов триангуляции получены рекуррентные формулы расчета координат вертексов и нормалей, необходимых для формирования соответствующих буферов WebGL. Для выявления условий приемлемости естественной триангуляции выполнен ряд численных экспериментов на примере данных SRTM с помощью специально разработанного Web-инструмента [215].

На основе существующих проблем в части моделирования поверхности рельефа на небольшие участки лесных экосистем, уровня макро-модели и микро модели, возможно применение вспомогательных технологий, не основанных на автоматизированных методах построения цифровой модели рельефа. При построении геополя на территорию 196 квартала Лисинского учебно-опытного лесничества получаем ровную поверхность геополя, на котором расположен квартал в Тосненском районе, Ленинградской области, являющегося компонентом Восточной-Европейской русской равнины.

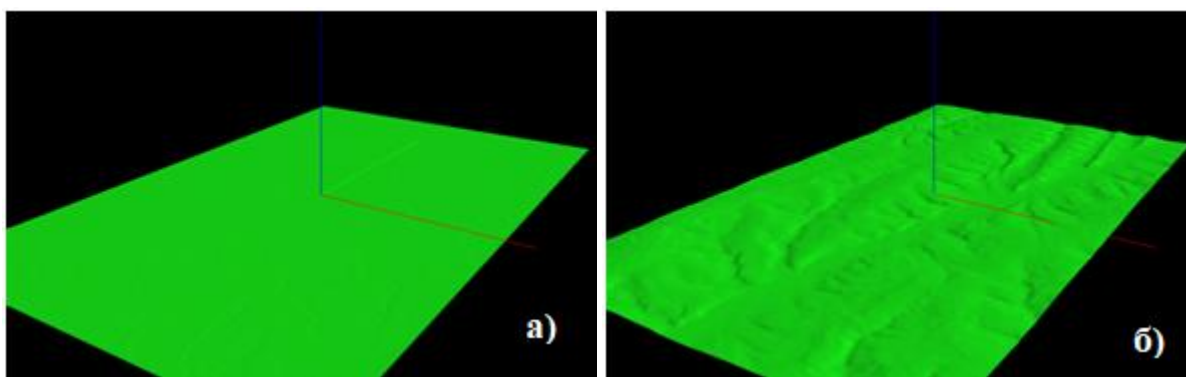


Рис. 57. Модели геополей полученные при помощи технологии WebGL: а) 196 квартала (Лисинское учебно-опытное лесничество), б) геополе с характерным отображением рельефа (Бугульминско-Белебеевской возвышенности).

Полученное таким способом геополе и в данном масштабе отображения 196 лесного квартала, упрощает процесс интеграции полученной основы в качестве первого слоя для геоинформационного моделирования. Однако, к примеру, при моделировании участка со сложной морфометрической структурой (Рис. 57 б) в качестве базового слоя полученное таким способом геополе, требует точного процесса этапа совмещения данных дистанционного зондирования Земли без смещений, данные должны быть правильно соотнесены с неровностями Земной поверхности, не иметь искажений после интеграции.

В данном случае, необходимо провести процедуру конвертации растровых данных, полученных на основе web-картографических сервисов или другого инструмента, к примеру, снимок местности, полученный средствами беспилотного летательного аппарата, в среду графического моделирования, что позволит перейти к процессу интеграции данных. При получении данных ровной поверхности, на те участки суши, где нет сложной морфометрической структуры рельефа, нет необходимости проводить интеграцию геополя из одной среды в другую, в таком случае достаточно создать UV-развертку чистого квартала зная его масштаб и площадь, непосредственно в среде геоинформационного моделирования. Перед интеграцией данных дистанционного зондирования Земли на сформированное геополе, необходимо определить качественные материалы дистанционного зондирования Земли. В качестве критериев выбора

наиболее качественных материалов, стоит обратить внимание на следующие характеристики: высота съёмки, яркость снимка, контрастность снимка, преобладающий тон, резкость снимка, масштаб, объём памяти исходного файла изображения.

При моделировании макромоделей лесных экосистем возможно использование открытых данных функционала Google Earth Pro и выбранного профиля, моделируемой поверхности на основе проложенного маршрута (рис. 58), что позволяет увидеть перепады высот местности по профилю заданного маршрута. В дальнейшем, данные показатели позволяют отобразить наиболее приближенную к естественной форме модель поверхности рельефа выбранного участка для моделирования макро-модели лесной экосистемы.

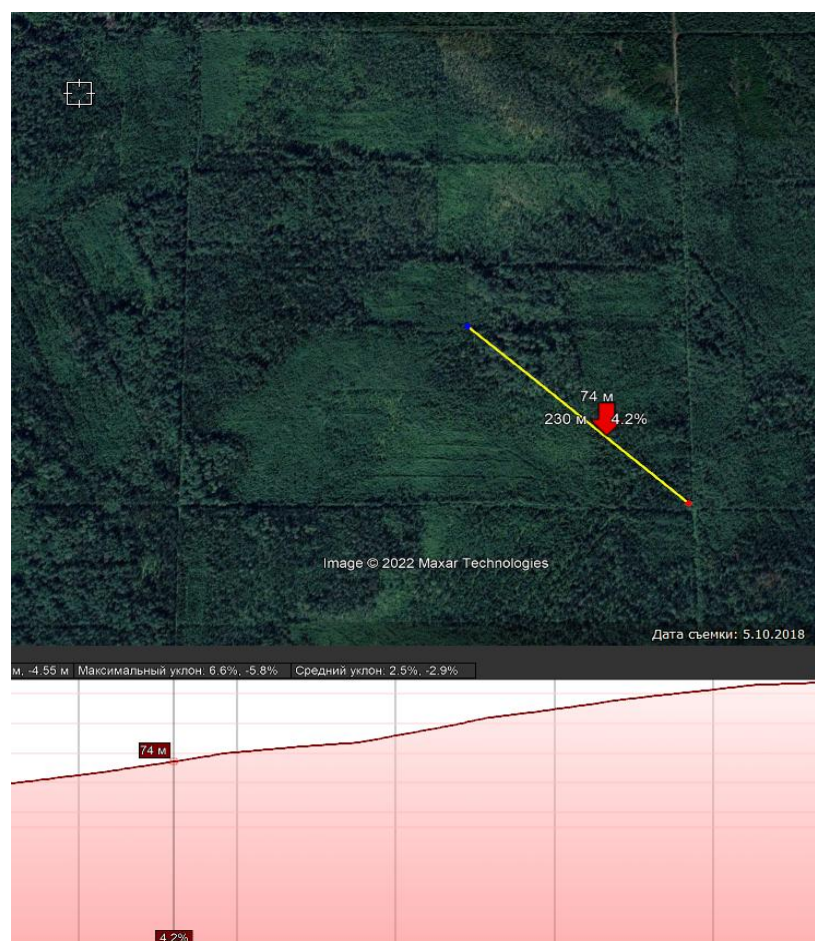


Рис. 58. Скриншот модели поверхности рельефа на основе выбранного профиля 196 квартала

Процесс разработки микрорельефа территории моделируемого участка леса, возможно, спроектировать двумя технологическими способами. Первый способ, при наличии устройства для проведения лидарной съёмки [30,47] или иного набора данных, раскрывающих морфометрические характеристики микрорельефа исследуемой местности, впоследствии интегрированные в среду геоинформационного моделирования. Второй способ - интерактивное моделирование рельефа территории в режиме скульптинга. Скульптинг - процесс разработки рельефа разработчиком модели, на основе полученного опыта и анализа морфометрической структуры рельефа, по-этапном способом цифровой трансформации геополя к естественному виду, при помощи функционала специализированного обеспечения в области трёхмерного моделирования поверхностей. Зная перепады высот, на небольшом участке, возможно построение модели рельефа, при помощи инструментов сглаживания поверхности, выпрямления поверхности, формирования деформаций по горизонтали и вертикали (рис. 59).



Рис. 59. Сформированная модель рельефа в режиме скульптинга

При моделировании рельефа в режиме скульптинга, в качестве вспомогательных данных характеризующих структуру моделируемой

поверхности Земли могут выступать дополнительно фотоматериалы поверхности моделируемой территории, карты высот, топографические карты, отражающие характеристики и параметрические свойства геополей. Процесс построения рельефа территории в ручном интерактивном режиме, не упрощает технологию геоинформационного моделирования, а требуют от исполнителя определённых навыков и опыта работы со специализированным программным обеспечением. Схожим образом организован процесс тематического дешифрирования, где таксатор-дешифровщик проводит стереоскопическую таксацию насаждений на основе обработки данных дистанционного зондирования Земли предложенных в работах авторах [221-223] и использующийся в настоящее время в практическом плане как достойно зарекомендовавшая себя технология стереоскопического дешифрирования лесных насаждений.

3.4. Формирование данных дистанционного зондирования Земли для геоинформационного моделирования и управления лесной экосистемой

С 1957 года непрерывно запускаются искусственные спутники Земли, целевое назначение которых от научных исследований, народнохозяйственных, коммерческих до военно-стратегических задач. Визуализация зарегистрированных спутников на разных типах орбит Земли по данным Satellite Map (рис. 60). На 2022 год на разных орбитах Земли зарегистрировано более 19 151 искусственных спутников, по данным web-картографического сервиса Satellite Map, колоссальный объем данных, передаваемый на Землю ежедневно позволяет использовать полученные материалы, в качестве научных исследований. Особенно перспективными для анализа Земной поверхности выглядят материалы, предоставляемые различными компаниями на условиях бесплатного доступа, предопределившие появление нового направления в геоинформатике - web-картографии [214]. Материалы, полученные посредством

импорта растрового изображения из среды web-картографических сервисов, являются данными дистанционного зондирования Земли.

Данные материалы выступают в качестве одного из быстродоступных типов данных и обладают большой разнородностью для последующего процесса и их использования в задачах геоинформационного моделирования. Такие данные, возможно, использовать в качестве промежуточного слоя, для размещения на его плоскости дополнительных типов данных, например трёхмерных данных.

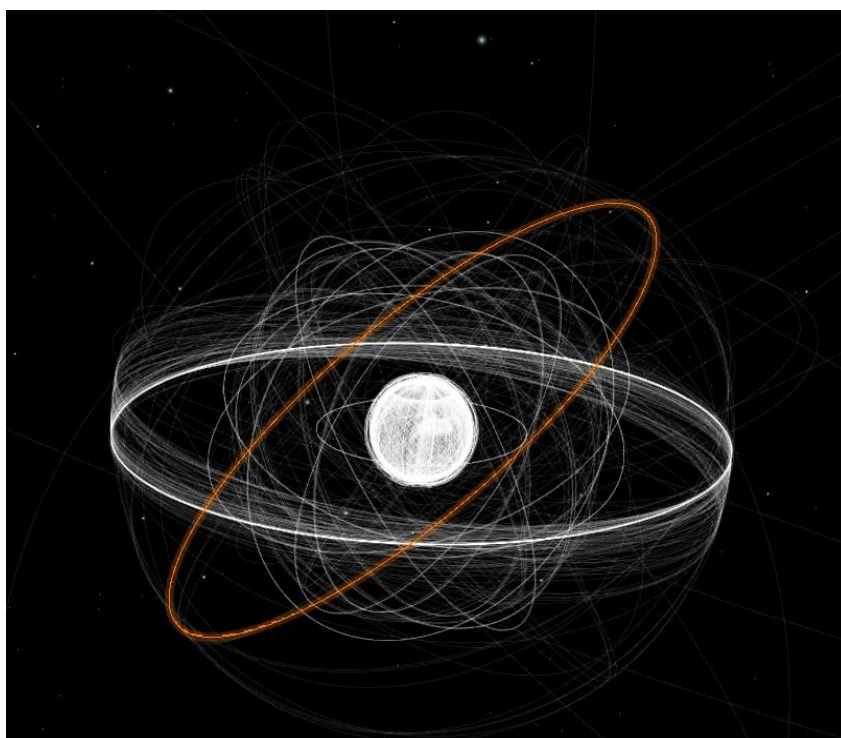


Рис. 60. Часть из траекторий зарегистрированных спутников на орбите Земли с по данным Satellite Map

Большое разнообразие открытых дистанционных материалов позволяет предварительно сделать ретроспективный анализ выбранного квартала. Провести предварительную обработку данного зафиксированного квартала перед последующим процессом его интеграции (рис. 61, рис. 62).

Для процедуры обработки снимка получим материал на основе открытых и качественных материалах виртуального глобуса Google Earth Pro. Характеристики и качества изображения представлены в (табл. 8).

Таблица 8 Характеристики изображения исследуемого квартала

№ п.	Показатели	Значения	Определяемые признаки
1	Квартал	196	Положение, площадь
2	Синтез цвета	RGB	Качество цветопередачи
3	Пространственное разрешение	3840x2160 Ultra HD	Пиксели
4	Размер	4,4 Мб	Объём данных
5	Выходные данные	Растр	Положение, структура

В процессе обработки используемого снимка, были улучшены спектральные характеристики исследуемого изображения, позволившие повысить:

- 1.Качество.
- 2.Цветопередачу.
- 3.Глубину цвета.
- 4.Установить чёткие границы локализирующие квартал.
- 5.Увидеть внутренние границы.

Обработку снимка произведена в профессиональном графическом редакторе Pixlr, среди улучшенных характеристик обозначим основные критерии обработки и приведем их в таблице 9. Обработка снимка перед этапом интеграции данных в среду геоинформационного моделирования необходима, ввиду того, что данные экспортированные из web-картографических сервисов имеют погрешности при их отображении, на них не видны следующие характеристики:

- не различимы четкие границы квартала;
- не различимы четкие границы таксационных выделов;
- на снимках имеются затенения;
- сложно произвести идентификацию отдельных деревьев;
- цвета отображены с затемнениями.

Однако данные дефекты, возможно устранить при использовании соответствующего программного обеспечения и корретировки растровых значений пикселей по определённым их свойствам.

Таблица 9 Обрабатываемые характеристики изображения

Характеристики	Значение по умолчанию	Откорректированное значение
Яркость	0	41
Экспозиция	0	-26
Контраст	0	-51
Коррекция чёрного	0	-16
Блики	0	-21
Резкость	0	16
Ясность	0	5

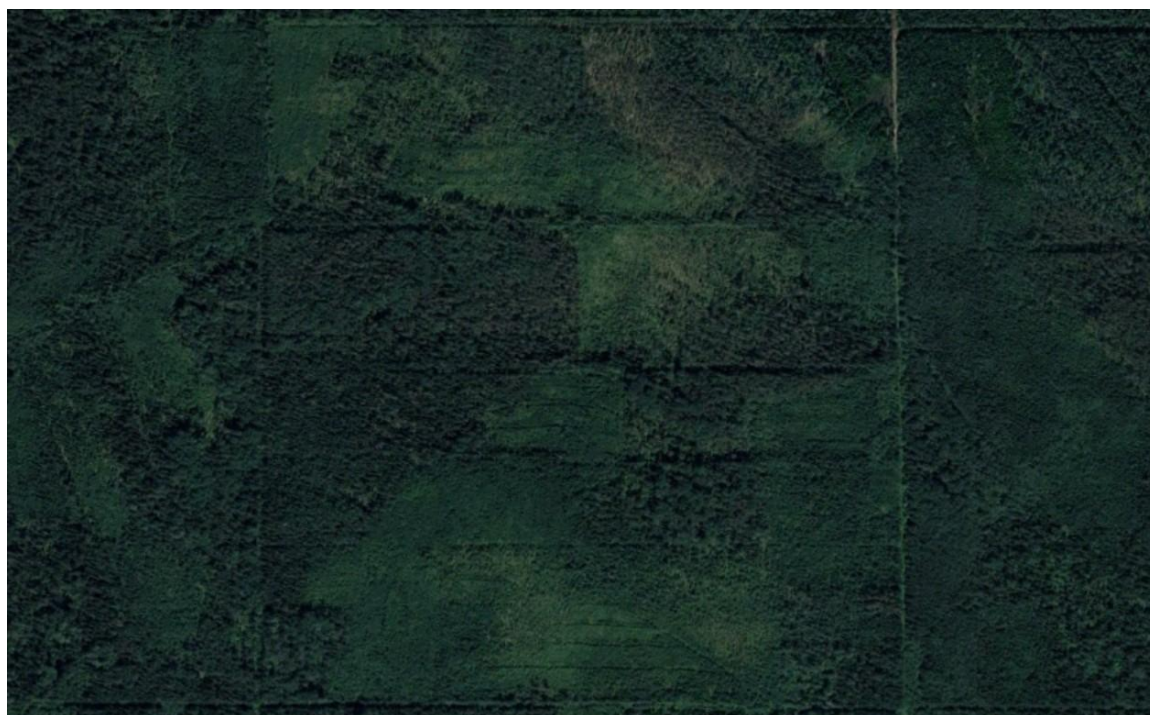


Рис. 61. Снимок 196 квартал моделирования (до обработки)



Рис. 62. Снимок 196 квартал моделирования (после обработки)

Импорт данных. В качестве инструмента обработки и создания динамической карты использован графический редактор Blender. Импорт данных в трёхмерный редактор Blender. Первоначальный этап в проектировании заключается в создании UV – развёртки. Отсутствие крупных гидрологических объектов на территории выбранного участка упрощает работу моделирования. Система лесоустройства предполагает деление освоенных лесов на кварталы, квартал – административно-территориальная единица, чаще всего в регионах с интенсивным ведением лесного хозяйства, представляет собой по форме квадрат или прямоугольник. Согласно п.3.2, и учитывая ровный рельеф квартала UV-развертку можно создать чистым квадратом.

Для реализации 1 этапа, до момента интеграции данных дистанционного зондирования Земли происходит локализация и фрагментирование выбранного участка. Использование геометрии лесных кварталов удобно, поскольку модель цифрового леса можно предзагрузить, разбить и анализировать, именно по отдельно смоделированному кварталу, что также обосновано экономией вычислительных средств, на конкретно рассматриваемые территории и учитывая при решении задач оперативного геоинформационного моделирования не

высокопроизводительные компьютеры для работы с геопространственными моделями геообъектов.

Общее завершение этапов состоит в получении и формировании качественной подложки на основе данных дистанционного зондирования Земли, что позволит в будущем проводить процесс интеграции трехмерных моделей в моделируемом пространстве наиболее точно. В главе 2 предложена классификация разделения геоинформационных моделей лесных экосистем по масштабу на 3 типа: дистанционная модель, макро-модель, микро-модель. Далее будет поэтапно описано проектирование и разработка каждого типа моделей, в зависимости от целей и применения для конкретных задач, разработчик модели проектирует конкретный тип модели в зависимости от их целевого назначения.

3.5. Дистанционная модель лесной экосистемы

После процесса уточнения и выбора территории покрытой лесом, переходим к созданию карты весов используя UV-преобразование в профессиональном графическом редакторе Blender. UV-преобразование или развёртка в трёхмерной графике (UV-map) — это соответствие между координатами на поверхности трёхмерного объекта (X, Y, Z) и координатами на поверхности текстуры (U, V). Значения U и V обычно изменяются от 0 до 1. Выбор границ локализации квартала осуществляется: первый способ вручную, по установлению границ визуально, на основе дешифрирования квартальных просек на снимке, после чего, фиксируется, локализуется (рис. 63), второй способ импортируется сетка, интересующего квартала в среду моделирования.



Рис. 63. UV-преобразование 196 квартала

Простота формы объекта геомоделирования, позволяет выполнить подразделение поверхности за счет инструмента “Подразделение поверхности”. Кол-во разрезов – 101. Такое число нужно для максимально точной работы при распределении деревьев в пространстве с помощью функции распределения “весов”. Результатом распределения на подразделение поверхности стало 42 000 вершин, что позволяет наиболее точно разместить древесные породы в пространстве (рис. 64).

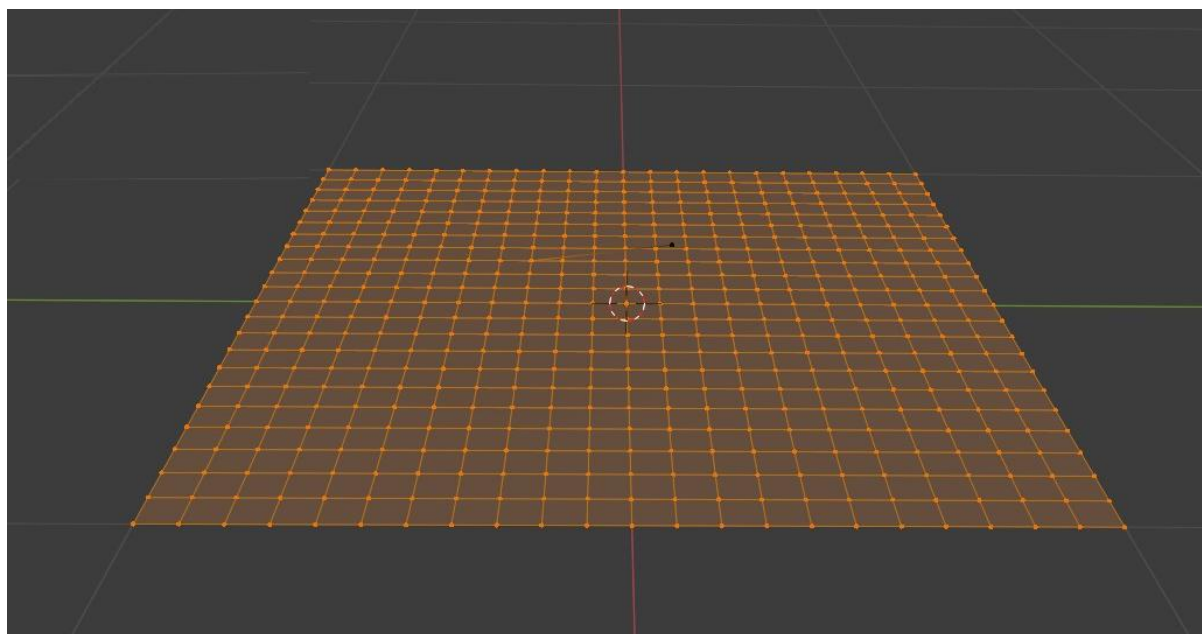


Рис. 64. Полигон подразделения поверхности в среде Blender

После создания итогового слоя и выполнения функции подразделения поверхности можно приступить к процессу размещения древесной растительности.

Однако в реализации данного процесса необходимо определить в каких областях лесного квартала она размещена и как правильно распределить области проектирования будущих 3-D моделей древесных пород для их естественного положения. Для удобства работы проведена процедура интеграции подготовленного слоя дистанционных материалов в систему Blender и последующего объединения с подготовленной UV-разверткой (рис. 65). Следующей задачей, является проверка правильного соотнесения сформированного геополя и наложенной подложки, проводится данная процедура визуально. Сформированное геополе должно находиться в пределах подложки, если поля выходят за пределы границ подложки, количество полигонов подразделения поверхности сокращается до искомого масштаба, наиболее точный процесс программного формирования геополей, с использованием технологии WebGL описан в научной работе [317]. Следующий этап, это выделение на объединённой подложке однородных участков леса, для последующего точного геоинформационного моделирования территории.

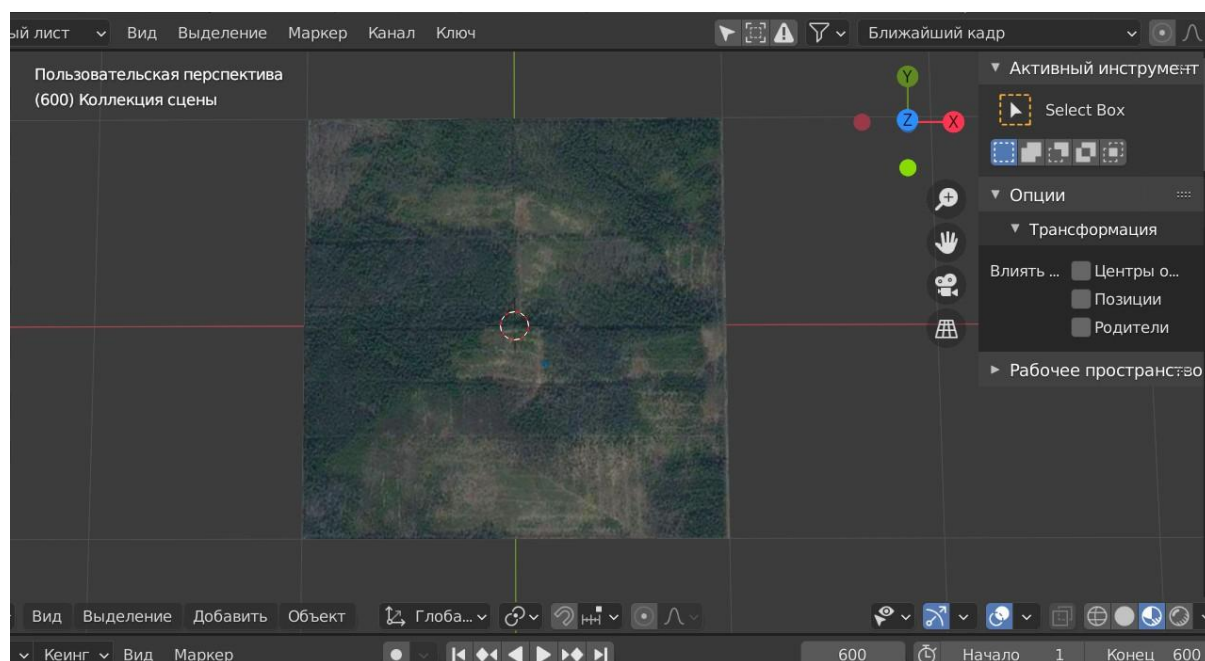


Рис. 65. Скриншот импорта подготовленной подложки

Для этого, можно воспользоваться автоматизированными функциями разделения лесного массива, на однородные по характеристикам объекты на снимке, данная процедура не является дешифрированием на таксационные выделы, данная функция только обозначает области, на которых произрастает древесная растительность и локализует части без древесной растительности (рис. 66 а, б).

Для ускорения процедуры локализации древесной растительности проводим процедуру инвертирования цвета, это позволяет четко обособить границы растительности и области, на которых были проведены вырубki. Возможно, дополнительно провести процедуру локализации древесной растительности, на обрабатываемом изображении при помощи инструментов полигонального выделения в любой используемой на данном этапе ГИС или графическом редакторе, задача данного этапа подготовить изображения к импорту в среду графического моделирования.

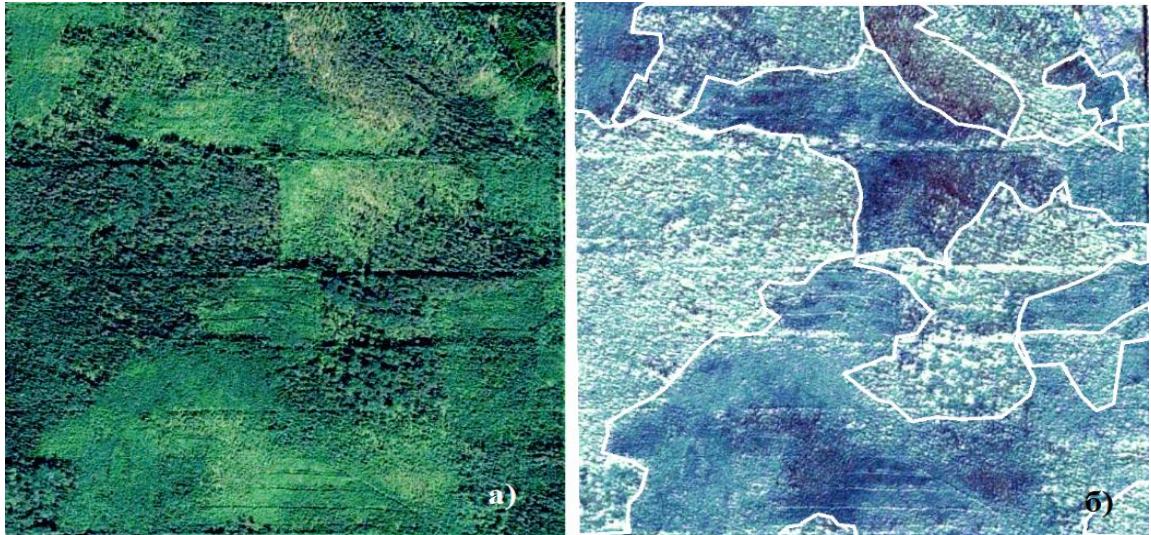


Рис. 66 а, б. Снимки локализации 196 квартала на зоны

а) отфильтрованный снимок;

б) инвертированный с разделением на участки без древесной растительности.

Реализовать данную функцию необходимо по следующим причинам:

- выделить на снимке области без древесной растительности;
- установить будущие границы в пределах которых будет производиться размещение трехмерных моделей;
- увидеть неявные (скрытые) характеристики на снимке, такие как дорожно-тропичные сети или гидрографические объекты.

Определение границ с древесной растительностью позволит перейти к режиму построения тепловой карты (heat map) на основе импортированного снимка с разделенными границами, тепловая карта в среде моделирования также показывает области, где необходимо разместить древесную растительность. Однако, она не дублирует функцию локализации из предыдущего этапа, тепловая карта позволит не выйти за границы локализационных участков при процедуре геопространственного размещения 3-d моделей древесных пород. Перед процессом размещения растительности требуется определить густоту насаждений в квартале, для этого возможно использование функции определения центра крон на исследуемом снимке средствами программного

обеспечения Wolfram Mathematica посредством встроенной функции `getCenter` [235].

Размещение древесной растительности в тепловых зонах на подготавливаемой карте. Определим на карте все точки центров обозначенных на подготовленной обложке крон деревьев. Это позволит определить центр фиксации, на который впоследствии необходимо разместить 3-d модель дерева, что обеспечит точное позиционирование дерева в геоинформационной модели.

В моделируемом пространстве имеется гетерогенная структура двух типов данных, крон деревьев состоящая из подложки растрового изображения, в которой есть центр (определяемой функцией `centroid` в Blender или `getCenter` в Wolfram Mathematica) и 3-d модель, в которой есть центр трёхмерного дерева, определяется как точка у основания ствола дерева. Задача состоит в том, что бы провести совмещение двух типов пространственных данных, в среде геоинформационного моделирования в одной позиции совместить две координаты точек (центра кроны и ствола 3-d дерева) на одной позиции к плоскости основания данных дистанционного зондирования (рис. 67 а, б).

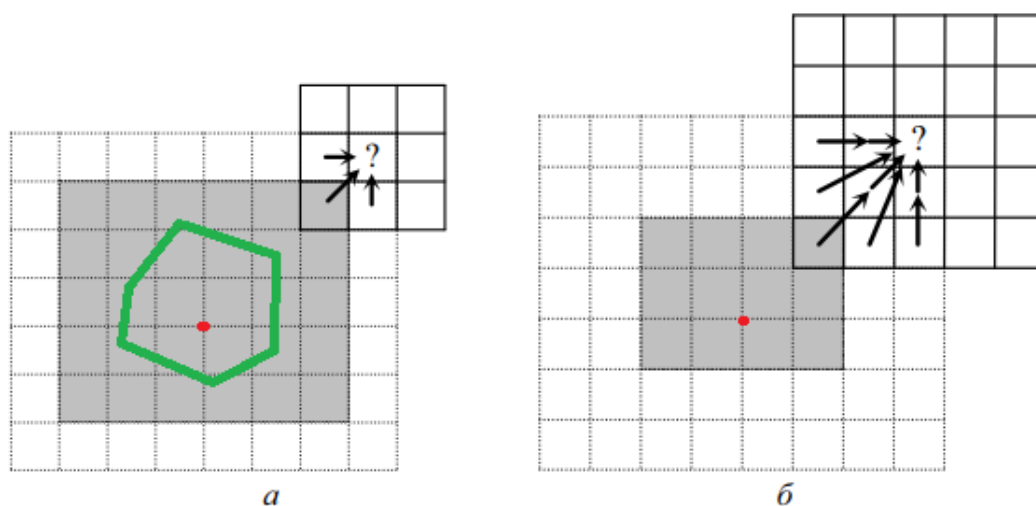


Рис. 67. Требуемое определение центра дерева (а) и поля (б) центра размещения 3-d модели

Вычисление центра происходит следующим образом: в рамках одного цвета из изображения строится массив числовых значений (RGB пикселей) 2-ого элемента. Который анализируется программным алгоритмом, производя поиск

следующих позиций: самой верхней и самой нижней точки по оси Y, самой левой и самой правой точки по оси X (расчет координат берется из левого нижнего угла изображения, где координаты (0;0)). Далее, по формуле, определяются координаты центра дерева с координатами x и y, где координата, $x = \frac{x_1+x_2}{2}$ а координата $y = \frac{y_1+y_2}{2}$. После определения центра крон (рис. 64) мы получили точку фиксатор для будущего размещения трёхмерных моделей лесообразующих пород деревьев [234].

Вычисляем центры крон, используя функцию getCenter (рис. 68).

Кроны разбиваются по 3-м элементам.

1-й элемент - изображение дерева.

2-й элемент - цвет в RGB.

3-й элемент - расположение центра на карте



Рис. 68. Определение центра кроны, центр кроны - точка с позицией в местной системе координат программы

Далее необходимо определить число деревьев в квартале геоинформационного моделирования, это можно достичь двумя способами. Первый способ ручной подсчёт количества деревьев в квартале, он трудоёмок, требует большой концентрации и перерывов работы для снятия нагрузки на зрительный аппарат исполнителя. Второй способ расчёт на базе программного алгоритма [238]. По полученным расчётам получаем данные густоты насаждений, результат которой составил 22 348 насаждений (рис. 69).

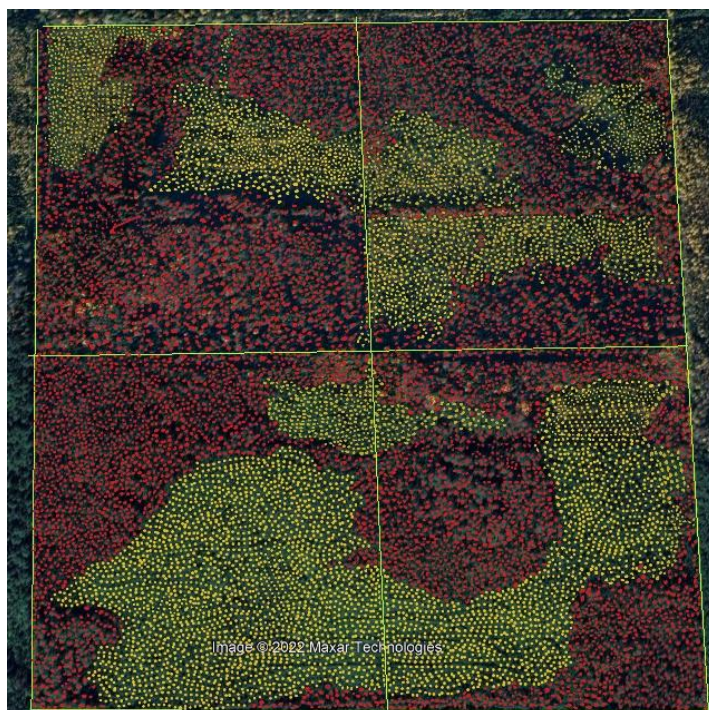


Рис. 69. Результаты расчёта густоты насаждений с выделением крон распознанных деревьев.

Ввиду того, что густота насаждений в исследуемом квартале достаточно плотная на площадь в 122,2 Га в 196 квартале определено количество в 22 348 единиц древесных насаждений для моделирования 3-d деревьев с вычетом насаждений, не достигших 2 класса возраста (обозначены жёлтым цветом на рис. 69). Процесс размещения растительности необходимо выполнить таким способом, чтобы провести процедуру по геопространственному размещению каждого дерева функционально и ускоренно, для этого подойдут разработанные низкополигональные трёхмерные модели деревьев.

Классический способ распределения трёхмерных деревьев по площади квартала заключается в их групповом размещении в тепловых зонах подготовленной карты исполнителем, по отдельному моделируемому дереву, с импортированными данными в среду моделирования данных дистанционного зондирования и определённых центров крон. Однако данный подход удобен только на небольших участках моделирования насаждений в пределах 1 гектара и больше подходит для моделирования парков и городских насаждений, а также при моделировании низкополнотных насаждений, где полнота древостоя менее 0,5. Для естественных лесов и с полнотой насаждений более 0,6 обозначенный

процесс хоть и выполним с технической точки зрения, но не рационален, трудоёмок и времязатратен. Для выполнения данной процедуры в полуавтоматизированном режиме необходимо обозначить каждой модели – Id, то есть присвоить идентификатор связывания точки с конкретным типом трёхмерной модели и прописать алгоритм размещения заготовленных моделей деревьев в тепловой зоне, согласно размещению 3-d модели на позиции центра кроны.

Импортированная предобработанная подложка позволяет точно установить границы для проектирования тепловой карты (рис. 70). Процесс разработки тепловой карты в среде моделирования Blender позволит наполнить зоны 3-d моделями деревьев, при помощи инструмента, система частиц, при использовании которого, только в зоне тепловой карты размещаются высокополигональные трёхмерные модели деревьев спроектированные (из заготовленной базы моделей деревьев) или низкополигональные.

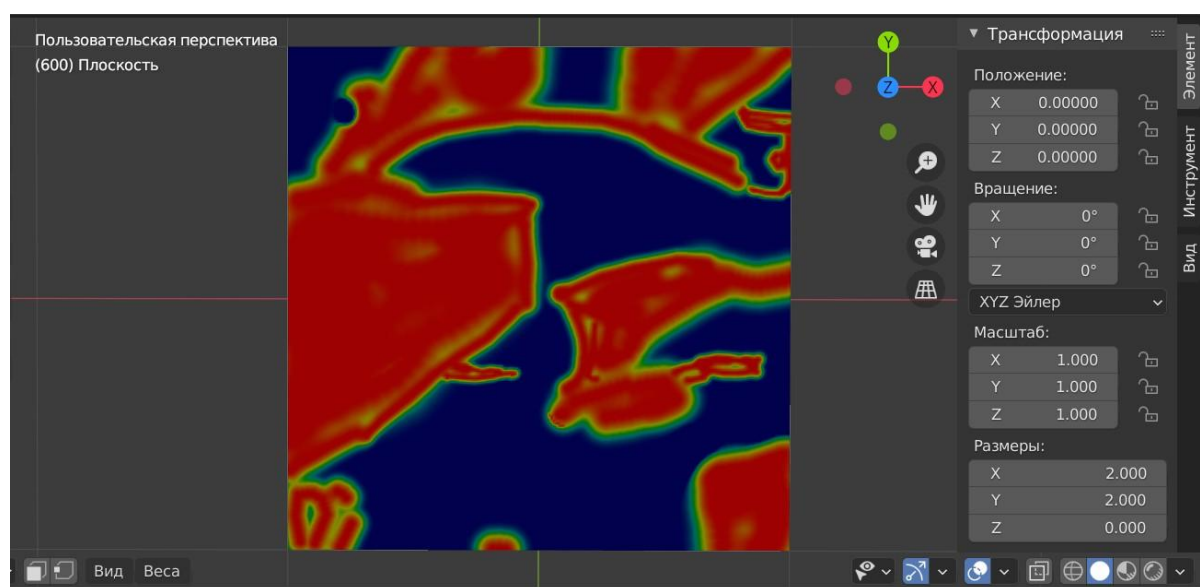


Рис. 70. Снимок построенной тепловой карты по распределению весов и границ покрытой лесом растительностью

Данный процесс можно производить при наличии уже готовой базы трёхмерных моделей основных лесообразующих пород. Процесс итоговой корректировки координатной привязки дерева к подложке данных дистанционного зондирования можно провести в соответствии с сопоставлением

базы данных координат каждого дерева, которая определяется центром группы пикселей кроны дерева на снимке, в стандартной системе координат и центром позиции трёхмерного дерева в местной системе координат среды моделирования (см. рис.68). Исследования зарубежных учёных показали [224], что технологии точечного позиционирования в системе GPS позволяет сделать точную привязку каждого дерева к данным дистанционного зондирования Земли. Данное обстоятельство будет учтено, в итоговой корректировке позиции 3-d модели дерева с его реальным отображением на местности. Данный этап относится ко второму этапу технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем, его можно обозначить как процесс геопозиционирования моделей лесной экосистемы.

В соответствии с таксационными данными, данными натурного обследования и материалами, полученными при помощи беспилотного летательного аппарата, основными лесообразующими породами 196 квартала являются следующие древесные породы:

- Ель обыкновенная (*Picea abies*)
- Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*)
- Берёза повислая (*Betula pendula*)
- Осина обыкновенная (*Populus tremula*)

Для интеграции в состав подготовленной тепловой карты использованы и разработаны низкополигональные 3-d модели деревьев (см. глава 2, п. 2.6), без выраженных морфологических характеристик. Задача данного процесса моделирования, только общее представление информации о количественном составе древостоя и пространственного размещения древесных пород. Стоит отметить, что в работе учёных [225] были предложены подходы по процессу моделирования трёхмерных деревьев средствами Python API, где основным инструментом выступает математическое моделирование на базе L-систем, разработанное ещё учёным-биологом А. Линденмайером [226], в упомянутых

работах отмечается о возможности интерактивного геомоделирования деревьев на базе дистанционных материалов.

Необходимо отметить о сложностях предложенного математического подхода при построении моделей природно-технических систем. Переносу биологических характеристик отдельных видов живой природы из реальной среды в цифровую среду дано определение - цифровой морфогенез [239]. В развитии методов данного направления возможен комплекс подходов, сочетающий программные и интерактивные методы моделирования биологических объектов в цифровой среде. При использовании одного подхода, например основанного только на принципах использования L-систем, формируемая в результате трёхмерная модель дерева выглядит не естественно. (см. рис.24).

Данный эффект основан на результатах визуализации построении трёхмерного дерева по заданному математическому алгоритму, он формирует строгое представление и отображение структуры ствола, ветвлений, мелких деталей, при этом достаточно точное. В реальной биологической системе, морфология деревьев более разнообразна и сложноструктурирована, она зависит от многих факторов. Процесс построения точной трёхмерной структуры дерева в определённом классе возраста, без дополнительного визуального моделирования, основываясь только на математическом аппарате, приведёт к такому результату, когда полученная модель не будет соответствовать натуре и выглядеть не естественно. Одна из проблем современного трёхмерного моделирования, большая вариативность биологических объектов в виду их морфологического разнообразия. Морфологическое разнообразие обосновано тем, что в природе количество внешних влияющих свойств на особенности хода роста древостоев, их приживаемость, физиологию, во многом зависит от географических особенностей территории местопроизрастания и зависит от внешней среды, в том числе и почвенных особенностей. В качестве технологического решения обозначенной проблемы, возможно формирование

ряда каталогов трёхмерных моделей, основных лесообразующих пород на крупные территориальные образования или регионов России, поскольку в пределах схожих географических особенностей, будут произрастать схожие по морфологии породы деревьев [227].

Поэтому в качестве более точных моделей, для использования в составе макромоделей и микромоделей лесных экосистем были сформированы трёхмерные каталоги отдельно хвойных и отдельно лиственных 3-d моделей лиственных лесообразующих пород [228,229]. Формирование которых, строится по принципу биометрического сбора данных лесообразующих пород Северо-Запада России, в каждом классе возраста насаждений и последующего компьютерного моделирования трёхмерных объектов, которые описаны в главе 2.

Важный фактор такого способа моделирования деревьев, по их классовому разделению - формирование в геоинформационной среде семантической связанности общего представления и взаимосвязей динамических слоёв лесной экосистемы, онтологическая карта, характеризующая разные структурные связи одних показателей от других. Семантическая связанность моделируемых объектов, в работе, достигается при использовании языка визуального скриптинга BluePrint, информационная связь моделируемых объектов основана на конструировании архитектуры связей взаимодействия различных свойств объектов в моделируемой среде с помощью графовой системы построения взаимодействующих компонент (рис. 71) [301].

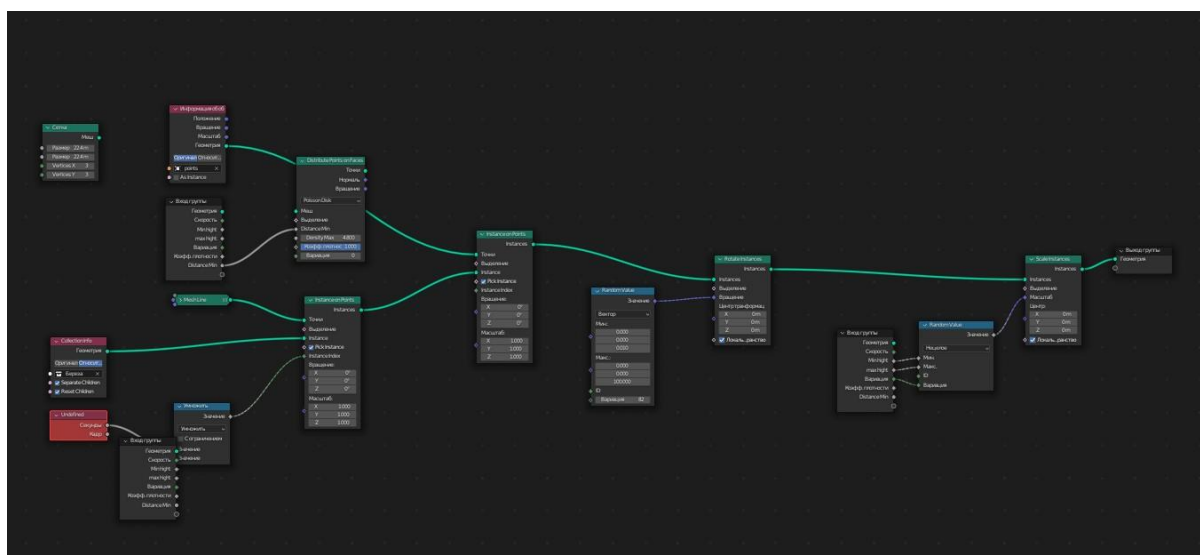


Рис. 71. Схема взаимодействия изменений классов возраста с течением времени в BluePrint в среде Blender

Если в процессе проектирования модели ведётся журнализация исполняемых действий разработчиком, то программный код, хранящий все проведенные манипуляции с объектом моделирования, и будет являться упорядоченной структурой самого процесса проектирования лесной экосистемы. Вышеуказанный способ позволит впоследствии использовать полученный массив данных и сформировать процесс автоматизированного итеративного машинного обучения для задачи построения геоинформационных моделей лесных экосистем при помощи нейросетей. Однако, для подготовки геоинформационного моделирования к автоматизации, необходимо для начала, комплексно, проработать и сформировать методологический аппарат работы технологии в данном варианте исполнения, что в будущем позволит перейти к решению задачи автоматизированного метода построения геоинформационных моделей лесных экосистем.

После процесса построения тепловой карты выключим подложку тепловой карты, итогом проделанной манипуляции является отображение всех точек оснований центров крон деревьев, перед размещением растительности в моделируемом геопространстве.

При выделении каждой точки присвоим id - обозначение родительского объекта конкретной породы. Это позволит нам установить соответствие густоты видимой части насаждений, каждая обозначенная таким способом точка представляет условное дерево-породу. После обозначения родительского класса каждой группе точек, включим отображение трёхмерных деревьев с их расположением на карте (рис. 72).

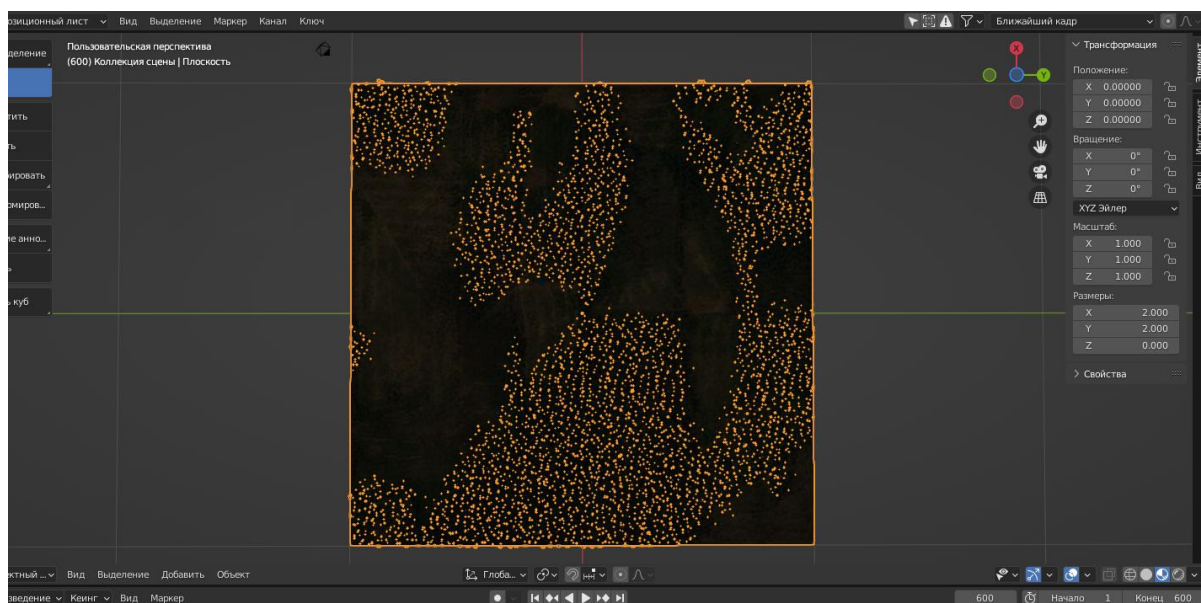


Рис. 73. Снимок отображения в пространстве точечных особенностей проектируемых моделей деревьев.

Процедура коррекции размещения растительности в геопространстве. В соответствии с обозначенным признаком пространственного соответствия, позиция трехмерного дерева должна соответствовать позиции подложке данных дистанционного зондирования Земли. Достичь данного условия возможно также вторым способом, интерактивным, где каждую породу исполнитель размещает над кроной дерева визуально, точность данной операции напрямую зависит от опыта работы с программным обеспечением и анализом данных дистанционного зондирования Земли исполнителя данной процедуры (рис. 74). Данный способ это второй вариант корректного отображения 3-d дерева на снимке, он может быть полезен, когда моделируемая территория не представляет собой крупный

по размеру лесной участок, но при этом требующий точного соответствия позиции дерева в позиции в натуре.

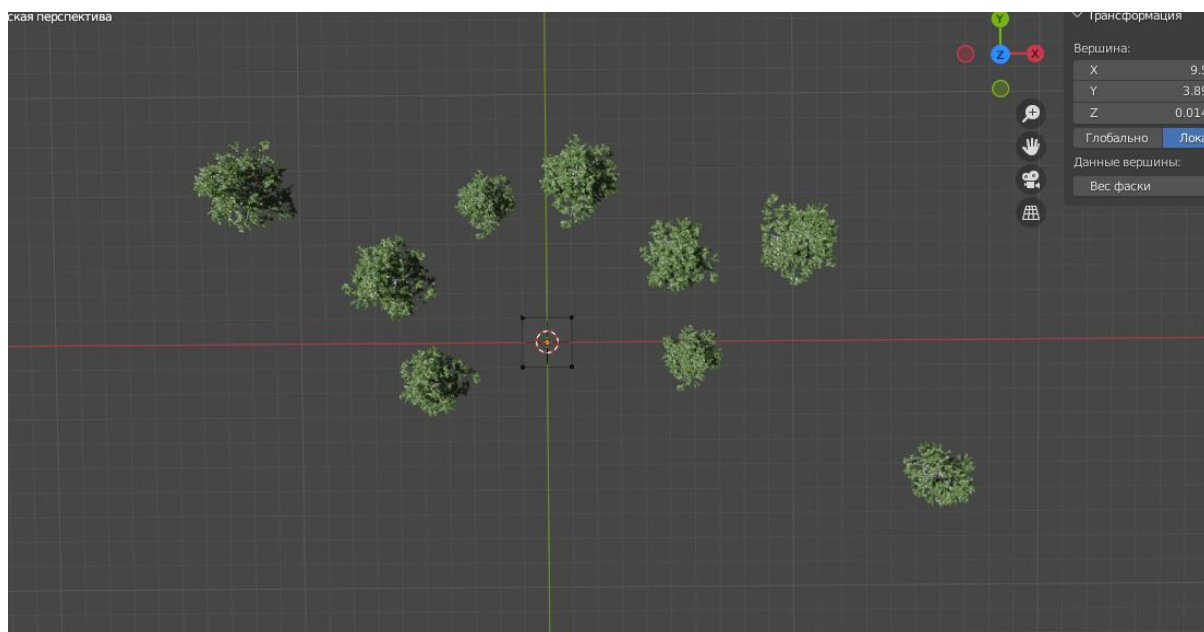


Рис. 74. Снимок интерактивного размещения древесных пород в моделируемом пространстве

Второй способ, является реализацией последовательного алгоритма, сформированного на базе исполнения логических условий: пусть заданные точки (А, Б, В и Г) являются проектируемыми древесными породами связанные с идентификатором к родителю в каждой точке. Основание 3-d модели дерева является стыковочной плоскостью 3-d модели с растром. Визуально расположим пространство моделируемой среды таким образом, в котором плоскость основания ствола дерева будет видна с обратной стороны, данная процедура позволит увидеть точку - центральную позицию дерева (рис. 75).



Рис. 75. Точка-фиксатор в основании ствола 3-d модели дерева (инвертированный по вертикали вид модели дерева)

Поскольку мы имеем заданное соответствие родителя к точке, требуется соотнести позицию 3-d дерева, к позиции кроны материалов дистанционного зондирования (подложки) в моделируемом пространстве. Результат соотнесения укажем в (табл. 10).

Таблица 10 Основные данные (пример) для соотнесения точек

Порода дерева	Идентификатор	Координаты позиции кроны (WGS 84)	Координаты позиции 3-d модели (Blender)
Ель обыкновенная	Класс А	59°27'0.03" С 30°43'38.10" В	-0.868776 m -0.365641 m 0 m
Сосна обыкновенная	Класс Б	59°26'59.76" С 30°43'37.59" В	-0.404466 m -0.430361 m 0 m
Берёза повислая	Класс В	59°26'59.56" С 30°43'37.33" В	-0.566349 m -0.130111 m 0 m
Осина обыкновенная	Класс Г	59°26'59.61" С 30°43'37.89" В	-0.036423 m -0.157143 m 0 m

Для этого, прописана функция наложения двух точек в одной рабочей плоскости, точки центра кроны растра и точки основания ствола 3-d модели дерева, связав их семантически при помощи реализации взаимодействия узлов геометрии (рис. 76).

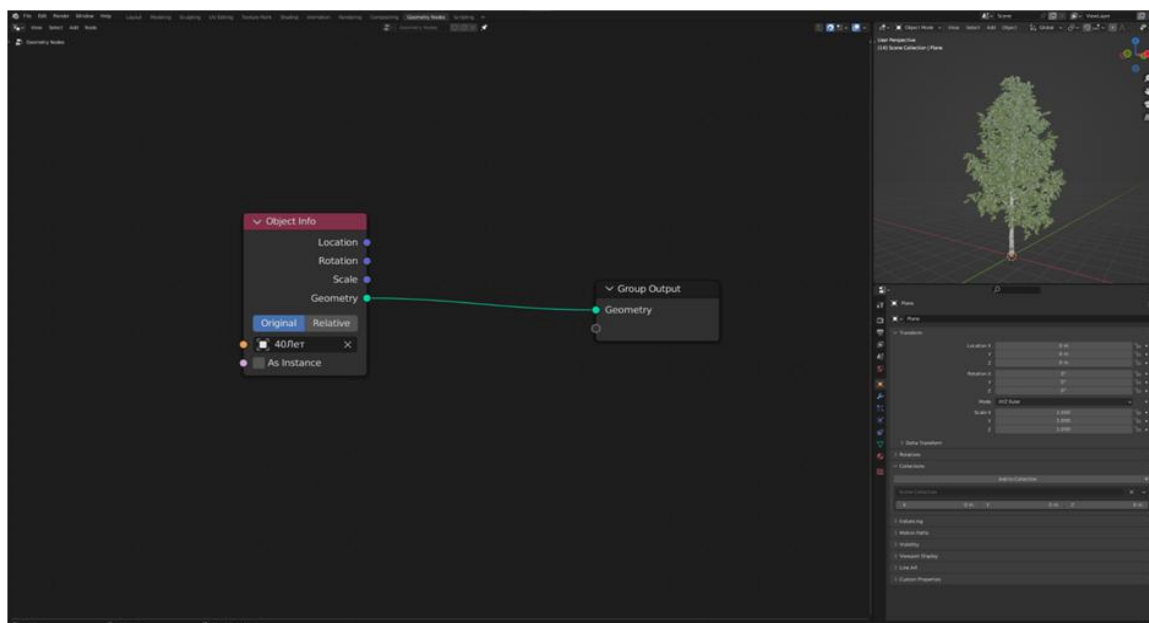


Рис. 76. Снимок связи узлов центра кроны с узлом 3-d модели

После подключения каждой группы лесообразующей модели к узлу точке кроны, можно вывести результат подключения. Результатом данного типа

отображения является функция интеграции трёхмерных моделей на подложку дистанционного зондирования Земли (рис. 77).

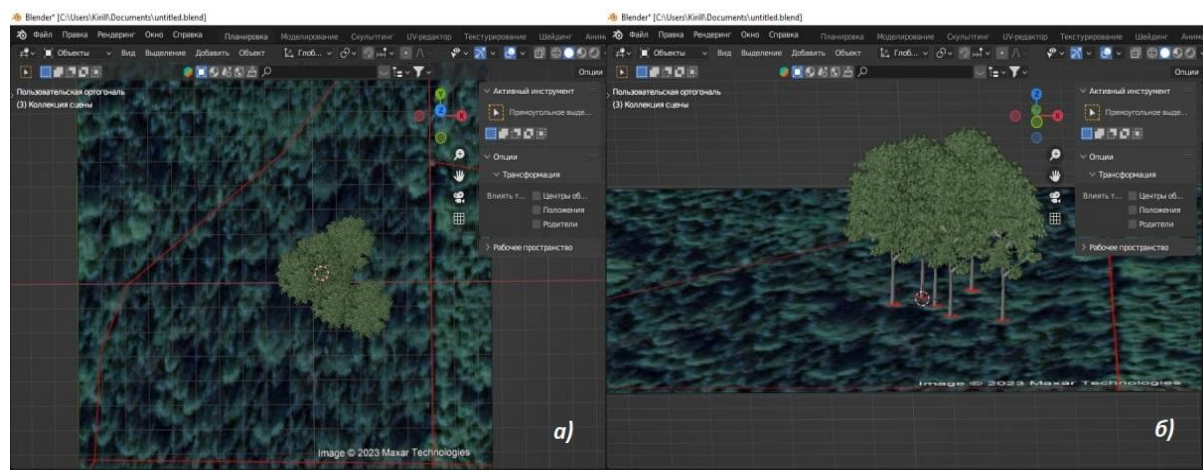


Рис. 77. Результат размещения трёхмерных деревьев на подложке: а) вид сверху, б) вид в профиль.

Созданная, итоговая дистанционная модель 196 квартала учебного опытного лесничества, после размещения трёхмерных деревьев, при этом данные дистанционного зондирования отображаются при включении подложки (рис. 78).

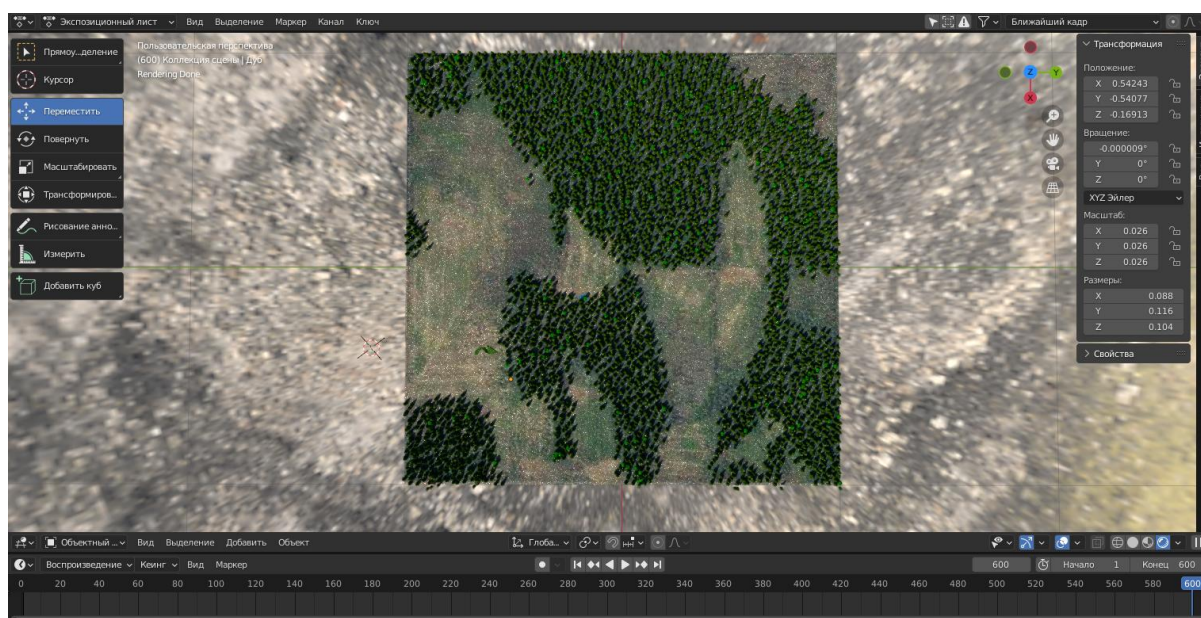


Рис. 78. Итоговый вид модели с интеграцией трехмерных данных

При включении основных типов данных и отображения низкополигональных моделей древесных пород они отображаются по всей

поверхности лесного квартала. Для проверки точности размещения растительности необходимо включить режим отображения тепловой карты (рис. 79). Задача данного этапа соотнести зоны тепловой карты с зоной отображения трёхмерной растительности, размещённые 3-d объекты не должны выходить относительно зон с тепловым размещением, а быть в их пределах. В случае если после интеграции отдельные деревья выходят за тепловые зоны, такое дерево выделяется и удаляется.

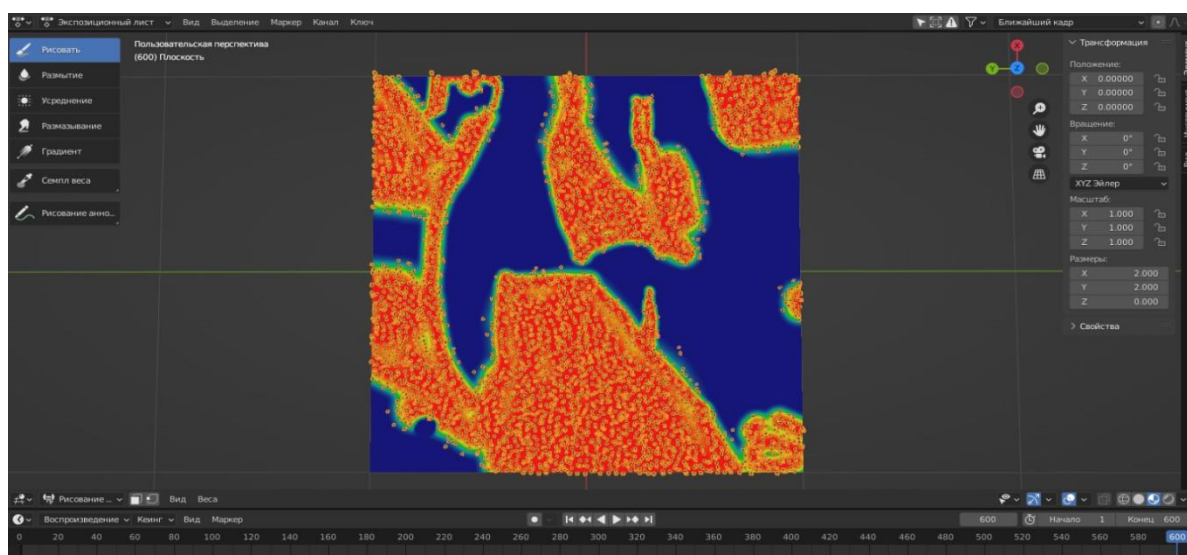


Рис. 79. Итоговый вид модели в режиме отображения тепловой карты

Обобщая результат формирования дистанционной модели в среде геоинформационного моделирования, можно представить основные компоненты и этапы технологии цифровой трансформации геобъектов в виде структурно-логической схемы моделирования основных компонент (рис. 80).

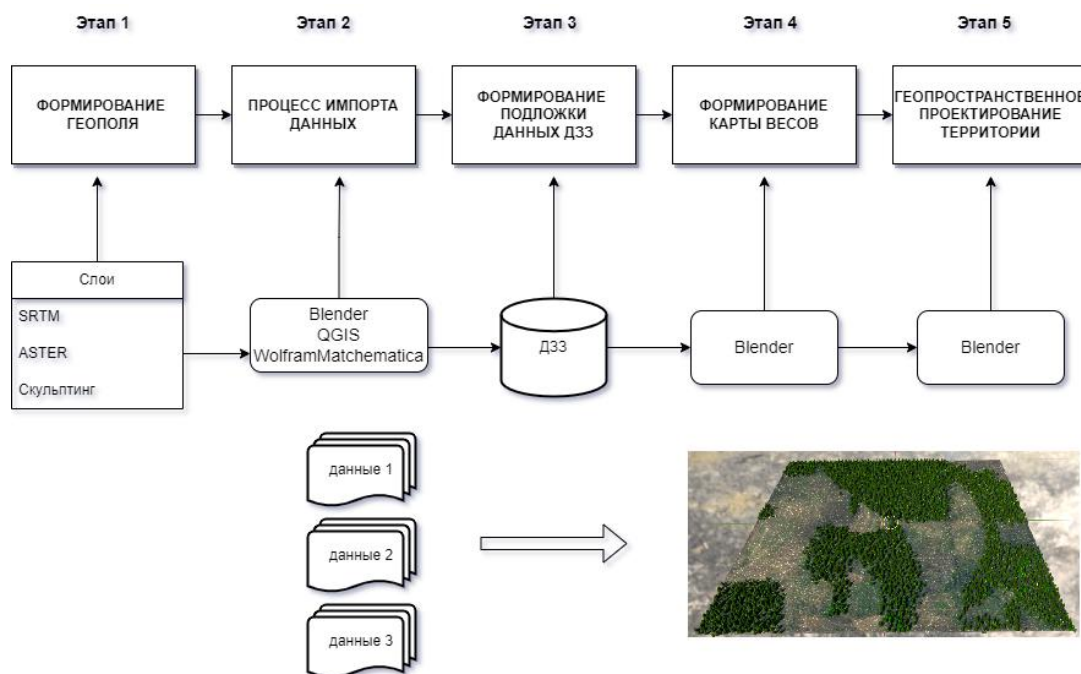


Рис. 80. Схема алгоритма цифровой трансформации модели на основе полевых данных

В масштабах дистанционной модели важно отображение группы деревьев в пределах исследуемой территории, их пространственное положение, территориальная структура и географическое размещение деревьев с учётом особенностей рельефа, границ природно-территориальных комплексов и отображением породного состава насаждений.

В данном типе разработки моделей нет необходимости создания детализированной базы по классам возраста, здесь модели могут быть выполнены в упрощённом виде для снижения нагрузки на вычислительный процесс. Стоит отметить, что при использовании процедуры комплексирования всех трёх типов разработанных моделей на одну территорию и при использовании масштабирования модели, возможен плавный переход от дистанционной модели к макромоделю и до уровня микромоделей. В таком случае, нагрузка на вычислительный процесс увеличивается, поскольку с увеличением масштаба лесной экосистемы усложняется структура древостоя, усложняются элементы детализации древесных моделей и визуализации их морфологических особенностей.

3.6. Макро модель лесной экосистемы.

Для каждого типа отображения пространственных данных существует необходимый масштаб отображения информации на приемлемом для восприятия уровне для возможности последующей интерпретации данных и последующих принятий решений. Масштаб отображения определяется, исходя из целей и задач объекта моделирования. Восприятие информации зависит от позиции объекта и его расположения в пространстве. *Второй уровень представления модели — макро-модель лесной экосистемы.* На данном уровне представления лесной экосистемы, подразумевается большая степень детализации на уровне отдельно взятого участка леса, здесь представление системы ограничено локальной территории, в пределах лесного квартала. Возможно отображение однородного по составу насаждения, таксационного выдела, территориально обособленной границы, отдельного элемента леса. В качестве дистанционных материалов, здесь будет не достаточным отображение данных с web-картографических сервисов, поэтому исполнитель на основе геоинформационного обеспечения для сбора информации может использовать данные полученные при помощи средств беспилотных летательных аппаратов или данные полученные при помощи аэрофотосъёмки с самолётов.

Геоинформационное моделирование лесной экосистемы на уровне представления макромоделей позволяет нам спроектировать лес, на конкретном участке в небольших масштабах наиболее точно (рис. 81).

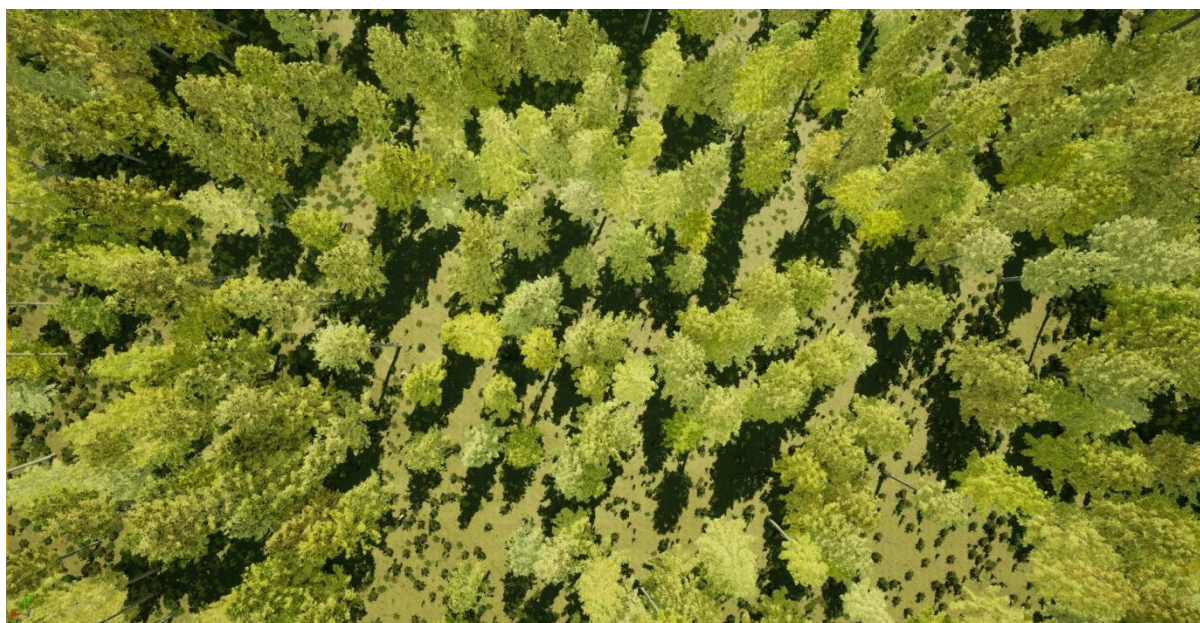


Рис. 81. Вид макромоделли лесного участка - вид сверху

В качестве причин такого детального представления данных, возможно моделирование восстановления леса после вырубki или динамики восстановления леса вследствие лесных пожаров, ветровалов, буреломов и других процессов результатом которых является потеря древесного покрова на занимаемой площади и достижения цели прогнозирования динамики лесных экосистем с сопровождающим процессом визуализации на основе геопространственных данных. Зная динамику лесовосстановительных процессов на разных жизненных стадиях древостоя, возможно, моделировать данные события методом интеграции данных в состав модели и прогнозировать развитие лесной экосистемы с течением времени.

На данном уровне представления лесной экосистемы и проектируемых 3D моделей имеется качественное разделение на основные лесообразующие породы, возможно проектирование второго яруса насаждений, морфологических особенностей пород деревьев. В зависимости от состава, возраста, структуры и густоты древостоя формируется модель в её наиболее детальном и функциональном представлении. На уровне макромоделли модели, уже недостаточна условность в моделях деревьев, здесь необходимо использовать сформированную базу данных лесообразующих пород [228, 229].

Уровень представления макромоделей лесной экосистемы удобен для работы с арендованными лесами, где требуется просмотр отдельных таксационных выделов, или выделенного фрагмента участка леса (рис. 82).

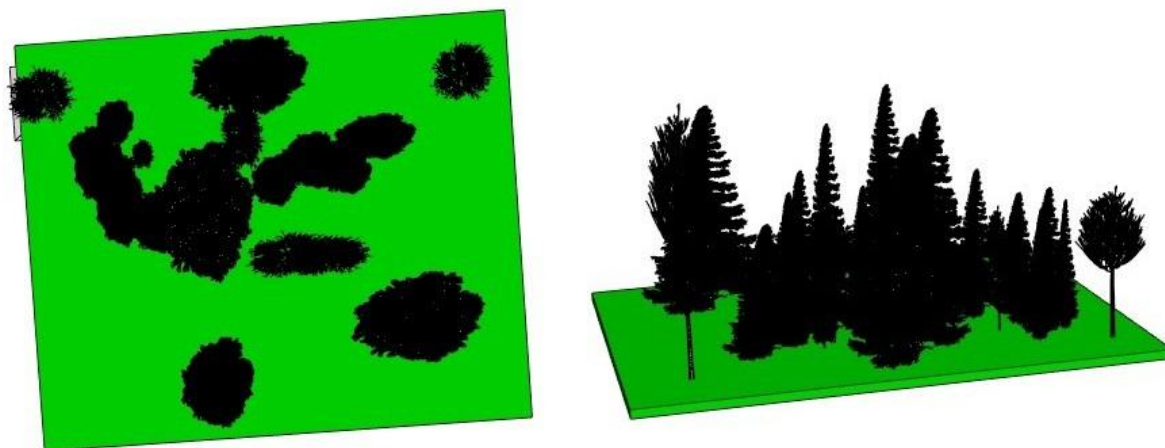


Рис. 83. Выделенные фрагменты лесной экосистемы.

Задача макромоделей состоит в демонстрации лицу, принимающему решения не только общего вида и положения древесной растительности в пространстве. В геоинформационной модели данного уровня, возможно детальное отображение конкретно рассматриваемых отдельных объектов лесных экосистем с указанием их характеристик. Обозначим основные этапы и последовательность формирования макромоделей лесной экосистемы, в данном процессе используется: среда моделирования и отдельно среда использования модели, как и в случае разработки дистанционной геоинформационной модели, это два разделенных технологических процесса выполняющихся в разных средах (рис. 84).

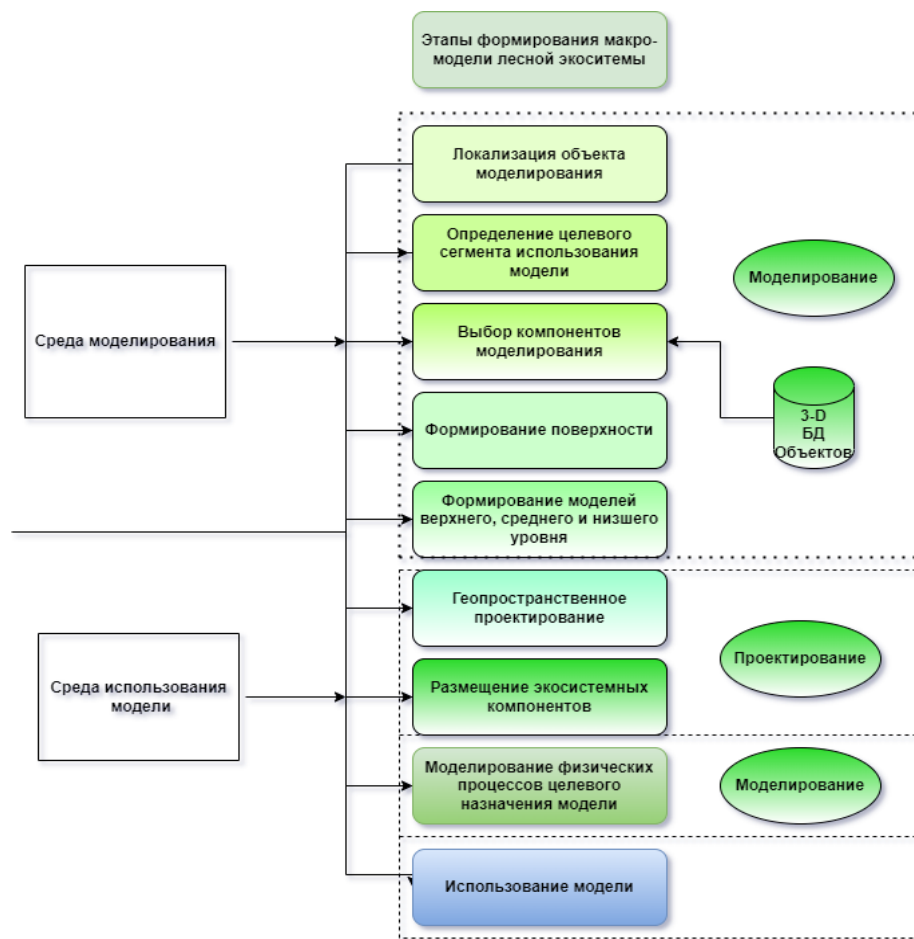


Рис. 84. Этапы разработки макромоделей лесной экосистемы

Выделить основные компоненты, задача которых отображение и предоставление информации на уровне макро модели лесной экосистемы возможно на базе декомпозиции моделей на группы:

- 1) Модели верхнего уровня.
- 2) Модели среднего уровня.
- 3) Модели низшего уровня.
- 4) Модели внутренних компонентов.

Таблица 12 Классификация 3-d моделей, компонентов лесных экосистем для разработки геоинформационных моделей

Модели верхнего уровня			
Элемент	Тип модели	Формат моде	Назначение
Лесообразующие породы	Сосна Ель Берёза	Группа Объектов	Дистанционная модель
Породы 2 яруса	Черёмуха	Группа Объектов	Макромодель
Кустарник	Бересклет Бузина	Группа Объектов	Макромодель
Модели среднего уровня			
Травянистая растительность	Бересклет Вейник	Объект	Макромодель, Микромодель
Растения индикаторы	Черника Брусника	объект-слой	Макромодель, Микромодель
Модели низшего уровня			
Покрытия	Текстуры поверхностей	объект по площади	Макромодель, Микромодель
Бриофиты	Мхи	Объект	Микромодель
Микобионты	Кладония	Объект	Микромодель
Модели внутренних компонентов			
Структуры тканей	структуры	внутренняя модель объекта	Микромодель
Структуры потоков	Сигналы	модель передачи информации	Микромодель
Модель микроорганизмов	3-d модель	объект	Микромодель

Такой способ представления лесной экосистемы позволяет сделать более удобным управление и мониторинг локальных территорий покрытых лесов, в

частности это могут быть особо охраняемые природные территории, заказники, заповедники. На уровне макро-модели можно функционально отобразить сменяемость древесных пород и обозначить места обитания. Процесс визуализации изменения древесной породы в геоинформационной модели с течением времени, необходим, поскольку он позволяет оценить пространственную динамику прогнозирования хода роста, густоту и плотность насаждения в модели. Стоит отметить, что существующие таблицы хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород, информативны, но визуально трудно читаемы, поскольку в них отсутствует сопровождающий визуальный компонент, динамическое изменение древесной растительности в пространстве в зависимости от изменений, данных в таблицах хода роста, данный компонент реализуем на основе предлагаемой технологии геоинформационного моделирования.

Для реализации функции изменения моделируемой породы с течением времени используем наиболее удобную для этого систему разделения на классы возраста древостоя. Класс возраста древостоя фиксирует определенные характеристики дерева на его определённой жизненной стадии с использованием разработанных баз трёхмерных моделей лесообразующих пород. Однако, наличие самой базы в статичном её существовании, не обеспечивает процесс сменяемости пород в пределах одной моделируемой зоны, а ручное удаление объектов одного класса возраста, с последующей заменой его на другой, не рациональный с технической точки зрения процесс. На основании вышеуказанного, стоит задача в разработке методики динамического изменения древостоя с течением времени. Для этого, используем технологии геоинформационных моделей, готовый каталог разработанных трёхмерных моделей деревьев и программное обеспечение Blender.

Разместим в рабочее поле программы сформированный каталог трёхмерных деревьев Берёзы (рис. 85). Далее в качестве проведения манипуляции работы с данными нам необходимо определить породу

моделирования, в качестве выбранной используем лиственную породу с шагом возраста в 10 лет. Пусть у нас имеется локализованная территория, с преимущественным составом Берёзы 1 класса возраста, в качестве эксперимента, требуется смоделировать участок леса в возрасте спелости берёзы в III классе. На основе 7 моделей будет происходить сменяемость породы с I по III класс возраста в течении заданного промежутка времени - 15 секунд.

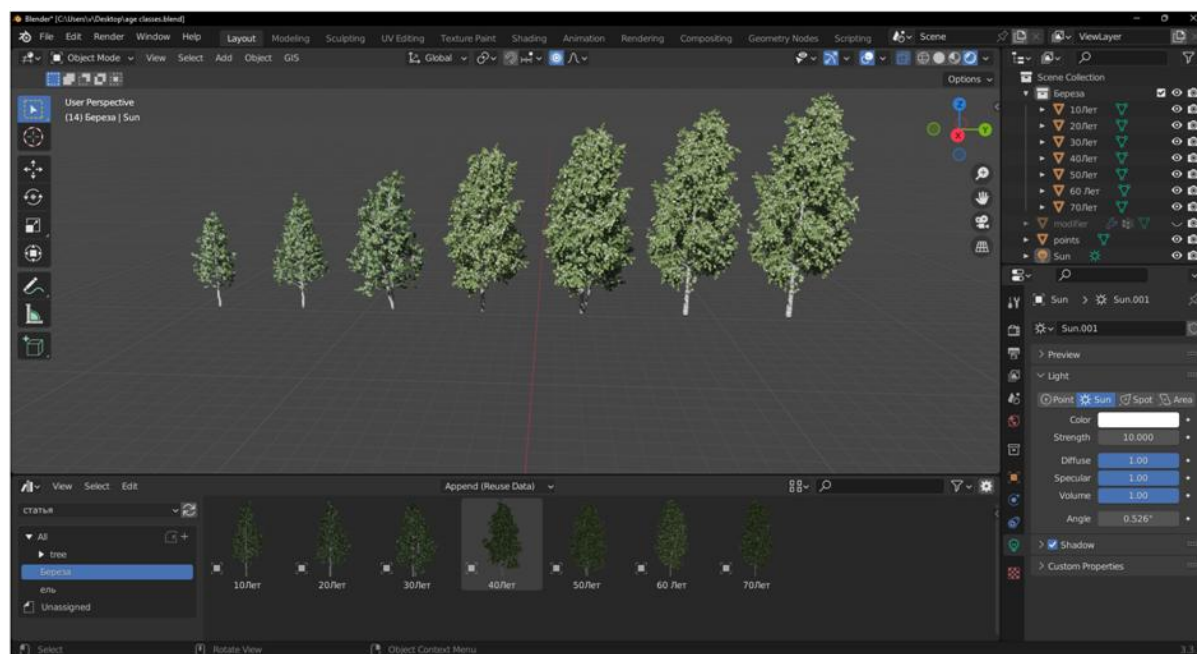


Рис. 85. Модели Берёзы обыкновенной разного класса возраста

В качестве основы поэтапного перехода одного класса возраста на другой используем систему визуального скриптинга с привязкой к смене частоты кадров с их поэтапной заменой. Основным преимуществом использования модификаторов узлов является не деструктивное изменение геометрии каждой модели, а интуитивный рабочий процесс перехода древостоя из одного класса возраста в другой, основанного на этапах изменений дерева в определённом жизненном цикле, с имитацией изменения времени [173].

В качестве технологического обеспечения использования переходов используем инструменты программного продукта Blender и системы узлов геометрии *“geometryNodes”*. Главным узлом в этой системе является функция *«work Instance on points»*. С помощью неё, мы можем ставить модели из

насаждения до VII класса возраста. Скорость смены частоты кадров, можно настроить средствами Blender. Это функция задаётся вручную.

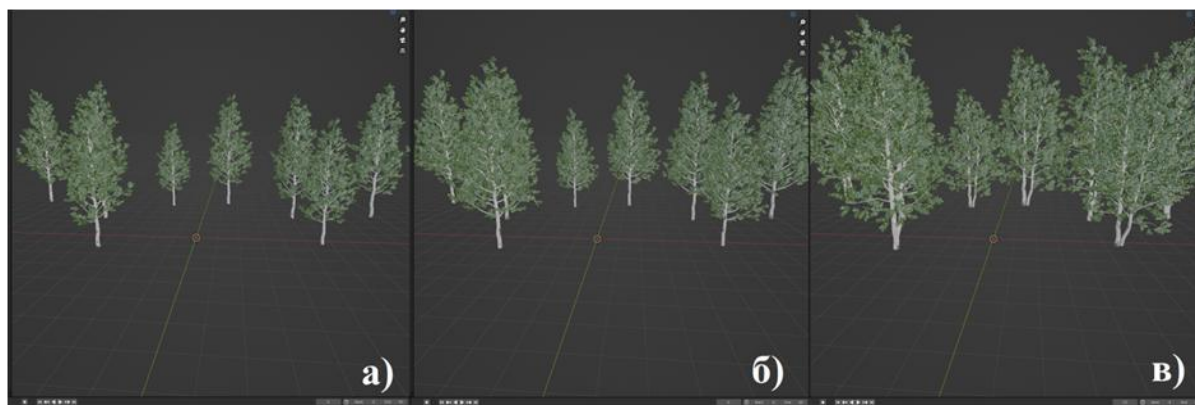


Рис. 87. Изменение классов возраста в рабочем пространстве

Функция «*Instance on points*» также имеет порты модификации экземпляров, таких как *Rotation* и *Scale* значения которых указывается с помощью узла *RandomValue*. Этот узел дает случайное значение в выбранном диапазоне, что придает модели более живой, естественный вид с деревьями разных размеров и возможностью углов поворота. Точки, на которые ставятся экземпляры – указываются в объекте *Points* в режиме редактирования. На базе проведенного эксперимента, можно сделать вывод, что аналогичным образом будут происходить и изменения других разработанных моделей, например хвойных пород. С технической точки зрения, возможна более плавная визуализации изменений возраста дерева с течением времени, однако, она требует использования более производительных вычислительных мощностей, при одновременном моделировании изменения целой геопространственной структуры лесного массива [238].

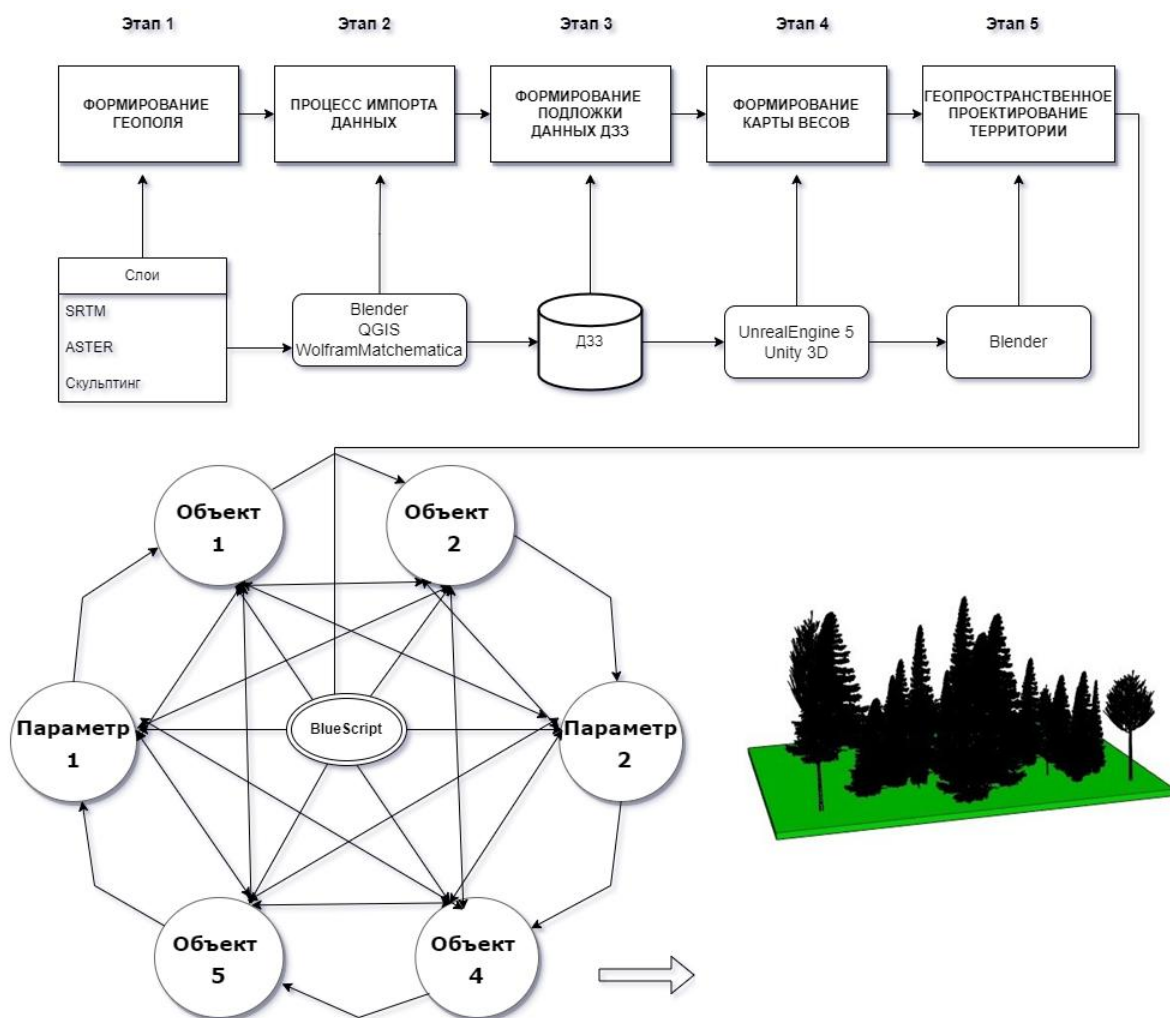


Рис. 88. Схема алгоритмов формирования и компоненты цифровой трансформации преобразования данных в макро-модель лесной экосистемы.

Обобщая результат формирования макро-модели лесной экосистемы в среде геоинформационного моделирования, можно представлены (рис. 88) основные компоненты и этапы технологии цифровой трансформации объектов лесных экосистем и вспомогательных компонент в виде структурно-логической схемы.

3.7. Микромодель лесной экосистемы

Наиболее сложной в технологической части визуализации сведений лесной экосистемы является отображение отдельных, небольших по размеру компонентов моделей представляющих лесную экосистему, именно отображение отдельных входящих экосистемных компонентов формирует наиболее комплексное представление о лесной экосистеме.

Для реализации данного подхода необходима разработка не только единой базы данных трёхмерных объектов отдельно смоделированных пород деревьев, но и разработка дополнительных трёхмерных моделей отдельных компонентов лесных экосистем, таких как живой напочвенный покров, травянистая растительность, кустарниковая растительность.

Описание процессов жизненного цикла объекта в таком случае необходимо для каждого смоделированного компонента. Жизненный цикл моделируемого объекта можно представить в виде инструкции поведения объекта за разный временной период, такую инструкцию называют картой поведения, именно наличие карты поведения характеризует модель как комплексно динамическую геоинформационную микромодель лесной экосистемы. Поскольку описывает не только внешние свойства объектов, но и раскрывает характеристики процессов, как одного объекта так и системы в целом. Компонент “микро” означает моделирование компонентов состоящих из трёхмерных моделей вспомогательных компонентов моделирования таких как, тип лесорастительных условий, травянистой растительности, отдельных представителей отделов моховидных, плауновидных растений, лишайников. При полевых обследованиях 196 квартала, произведена фотофиксация некоторых компонентов микромоделей лесных экосистем (рис. 89). Полученная таким образом основа является источником описания входящих для геоинформационного моделирования объектов.



Рис. 89. Снимок живого напочвенного покрова, компонентов геоинформационных микромоделей

Объединяет данные объекты то, что все они небольшие по своему размеру, так же данные объекты имеют пространственно-временную привязку к местности и свой жизненный цикл, как правило, такие элементы находятся под пологом леса.

Степень детализации микромоделей экосистемных компонентов позволить оценить мельчайшие подробности в изменении и организации структуры древостоев на микроуровне их взаимодействия и возможного моделирования передачи информационного обмена между различными компонентами лесных экосистем с их визуализацией.

Понятие микромоделей лесной экосистемы применимо, когда целью моделирования является научная визуализация небольшого по размеру участка леса, в пределах 10-20 метров, но с максимально подробным его описанием и моделированием его составных компонентов. Особено в практике лесного хозяйства зарекомендовали себя пробные площади объектов, микромоделей

пробных площадей способны обеспечить дополнительный набор данных для исследования лесных экосистем и состава древостоя.

В качестве основных компонентов для формирования микро-модели используем данные натурного осмотра 196 квартала Лисинского учебно-опытного лесничества.

Примечательно, что в качестве материалов, недостаточны только материалы, полученные с беспилотного летательного аппарата, несмотря на то, что они дают общее представление о пространственном расположении основного лесообразующего компонента – древостоя с высоты. Для моделирования мелких деталей лесных экосистем, разрешающей способности при пролёте БЛА над кронами деревьев недостаточно, здесь требуются инструменты геоинформационного обеспечения способные зафиксировать компоненты таких элементов как типы леса, тип лесорастительных условий, структуру и санитарное состояние внешнего вида древостоя, например состояние коры основных пород, подстилающей поверхности.

Для формирования основных этапов моделирования представим компоненты в виде блок-схемы основных составляющих. В обобщённом виде основные этапы моделирования микромоделей делятся на процессы, непосредственно разработку самих компонентов и функции, которые можно проделывать с моделируемыми объектами (рис. 90).

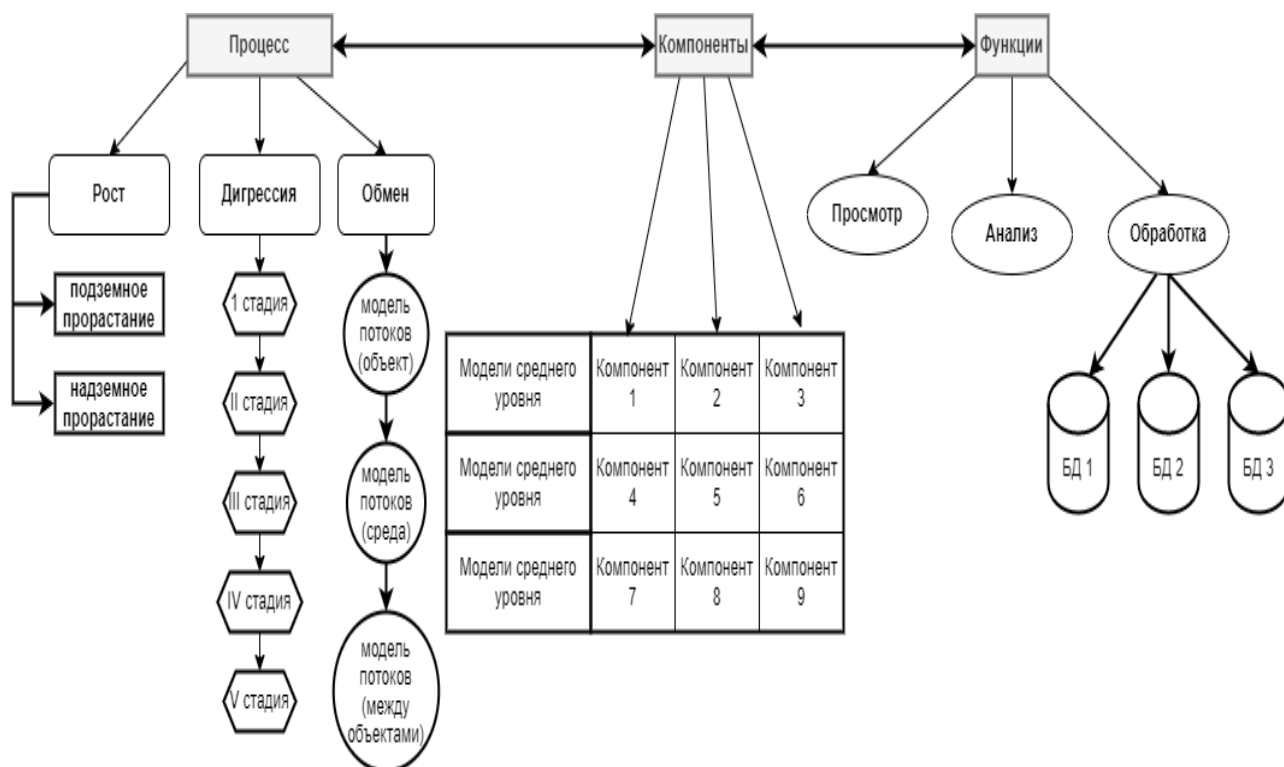


Рис. 90. Блок-схема процесса составляющие процесса геоинформационного моделирования микромоделей лесной экосистемы

Для данного способа представления лесной экосистемы в виде микромоделей имеет значение описание принципов работы лесной экосистемы в цифровой среде во всех её особенностях, включающих следующие характеристики:

- геоботанические характеристики и процессы изменения свойств объектов при жизненном цикле геоинформационного моделирования;
- лесопатологические характеристики и их моделирование;
- структурные и морфологические особенности отдельных деревьев;
- почвенные характеристики;
- микологические характеристики.

Технология отображения микромоделей участка леса включает не только геопространственное моделирование, основных лесобразующих пород, но и пород второго и третьего яруса насаждений — также необходимо проектирование живого почвенного покрова и процессов, влияющих на изменение и сменяемость растительности в зависимости от внешних факторов.

Данные модели наиболее удобны для анализа отдельных жизненных процессов растений. Во многих графических редакторах поддерживается возможность просмотра не только внешнего вида объекта, но и его внутренней структуры, когда такие объекты объединены в единую модель в них отображается комплекс моделей. Описание входящих объектов на программном уровне необходимо разделять на составляющие и сложности реализации компонентов лесной экосистемы, отдельно необходимо описывать поведение конкретных процессов передачи информации между элементами различных подсистем на микроуровне, к такому типу взаимодействия можно отнести питание растений, энергетический обмен, дигрессия лесной экосистемы. Микромодели лесной экосистемы способны:

- отобразить процесс роста отдельного дерева;
- смоделировать питание корневой системы;
- отобразить развитие лесопатологических процессов в лесной экосистеме на уровне отдельного дерева.

Потенциал геоинформационного моделирования на уровне представления микромодели многообразен. Технология трёхмерного отображения данных с их конкретной привязкой к моделируемой местности леса позволяет визуализировать не только статичные объекты, но и информационные потоки в растительном сообществе, включая визуализацию внутренней структуры транспортных потоков веществ в биогеоценозе.

Данный уровень представления информации о лесе открывает возможности моделирования физиологических процессов растений, возможности моделирования и определения причин патологий внутри стволов деревьев и визуализации распространения болезней растений с течением времени на конкретном виде дерева с конкретным типом болезни.

Для обеспечения процесса моделирования необходимой информацией необходима точная привязка моделируемого пространства к местности, что приводит к единообразию и каталогизации типов разработанных моделей.

Особенность геоинформационных моделей состоит в возможности интегрирования и визуализации дополнительных данных в состав моделей, данных геостатистики, инфограмм агрохимических показателей (рис. 91). По мере расширения набора данных такая модель становится комплексной и информативной. При моделировании конкретных сценарных событий происходящих в лесных экосистемах (пожаров, вспышек энтомовредителей). Возможно редактирование каждого из проектируемых факторов — в таком случае каждый из моделируемых событий становится динамическим, способным меняться с течением времени. При описании сценариев изменений в лесной экосистеме моделируемых процессов изменений различных факторов в среде, возможно применение геоинформационных моделей для оценки: степени развития лесопатологии, степени поражения лесной экосистемы от лесных пожаров, оценка интенсивности и скорости распространения моделируемого параметра. При этом, сложность геоинформационной модели лесной экосистемы определяется как совокупность моделируемых параметров - $K_{\text{ГМЛ}}$

$$K_{\text{ГМЛ}} = \frac{k_{\text{мик}} + k_{\text{сис}}}{S_{\text{пл}}}$$

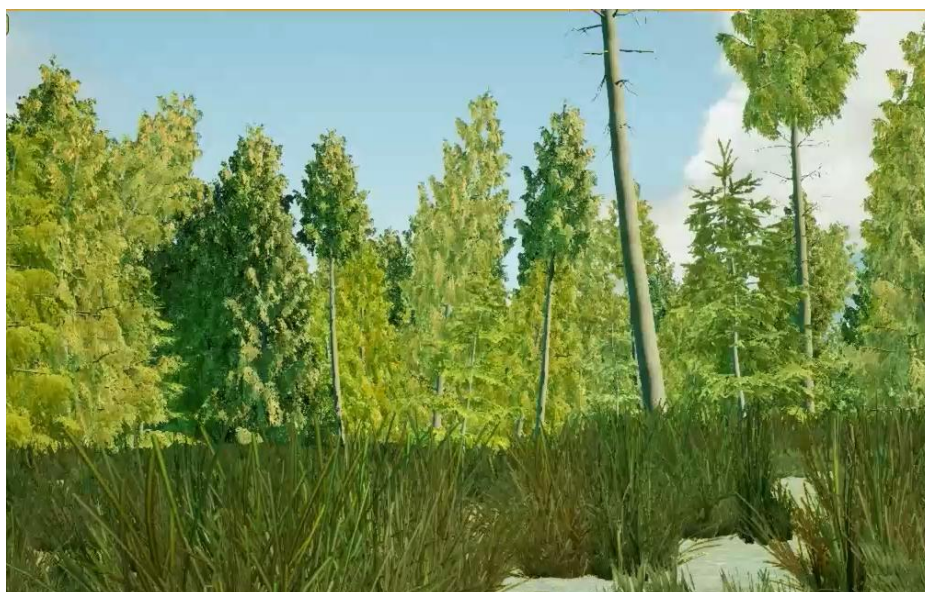


Рис. 91. Геоинформационная модель 196 квартала учебно-опытного лесничества

где, $k_{\text{мик}}$ - количество моделируемых компонентов

$k_{\text{сис}}$ - количество моделируемых подсистем в модели

$S_{пл}$ - площадь моделируемой территории

Микромодели по количеству моделируемых элементов и сложности реализации, возможно, классифицировать на определённые категории.

1. Сверхсложная микромодель - количество моделируемых компонентов на моделируемом участке более 200 включая модели процессов.
2. Сложная микромодель - количество моделируемых компонентов более 100.
3. Средняя микромодель - количество моделируемых компонентов более 50.
4. Простая микромодель - количество моделируемых компонентов не более 20.

Для определения целостности геоинформационной модели определим показатель комплексности модели (Н) включающий в себя сумму измеряемых величин.

$$H = \frac{N_{\text{подсистем}} + V_{\text{кол}} + P_{\text{параметров}}}{S_M}$$

Показатель N - характеризует количество моделируемых подсистем. Показатель V - характеризует общее количество моделируемых трёхмерных объектов. Показатель P - характеризует общее количество моделируемых параметров среды, S_M - площадь модели.

При формировании микромодели лесной экосистемы включается живой напочвенный покров и подстилающая поверхность леса, состоящей из многообразных живых и неживых компонентов расположенных в геопространстве (рис. 92).

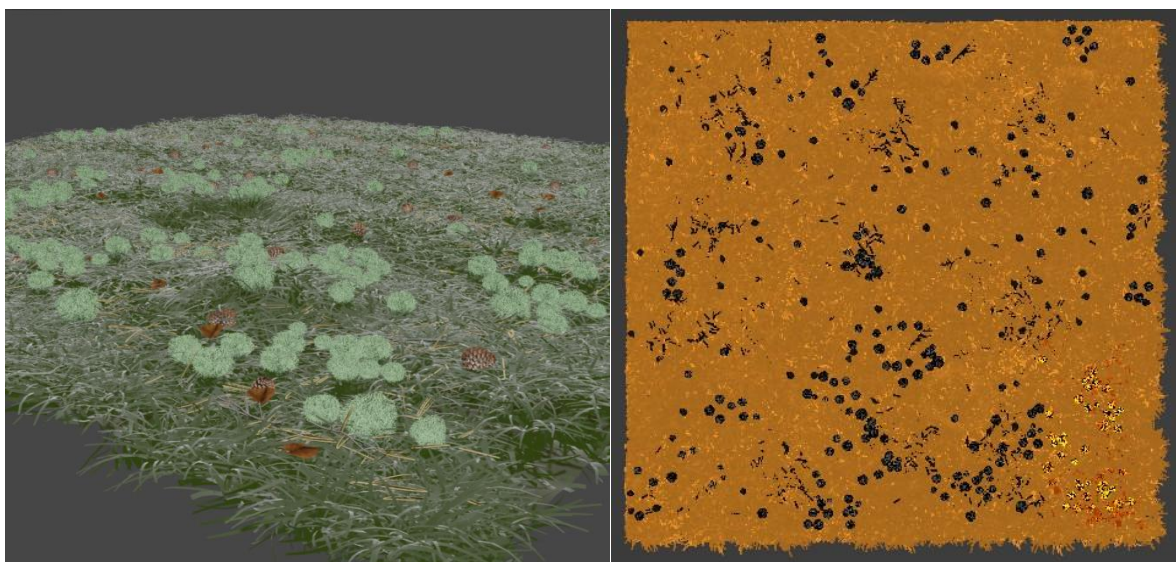


Рис. 92. Снимок микромодели лесной экосистемы

Основные компоненты моделирования. Стоит отметить, что в одной геоинформационной модели может быть разное количество моделируемых подсистем, а их модели могут являться частью одних подсистем и других одновременно, поэтому при моделировании конкретных целевых моделей, необходимо предварительно сделать разграничение типов моделей на связность и принадлежность к определённой подсистеме моделирования объектов.

Обобщая результат формирования микромодели в среде геоинформационного моделирования, можно представить основные компоненты и этапы технологии цифровой трансформации геобъектов в виде структурно-логической схемы моделирования основных компонент (рис. 93). Примечательно, что процесс микромоделирования в целом, адаптируем не только для естественных растительных сообществ, но при помощи аналогичной технологии возможно построение микро-модели, например городских газонов, искусственных насаждений. Поскольку газоны состоят преимущественно из травянистых, злаковых растений, их жизненный цикл и формирование компонентов возможно смоделировать в среде геоинформационного моделирования. В сочетании с процессом геоинформационного моделирования возможно указать общее обозначение - геоинформационная микромодель городского газона. Геоинформационная

микромодель городского газона - это трёхмерная геопространственная цифровая копия участка газона с возможностью проработки его изменения во временной динамике с учётом развития жизненного цикла каждого травянистого растения в его составе.

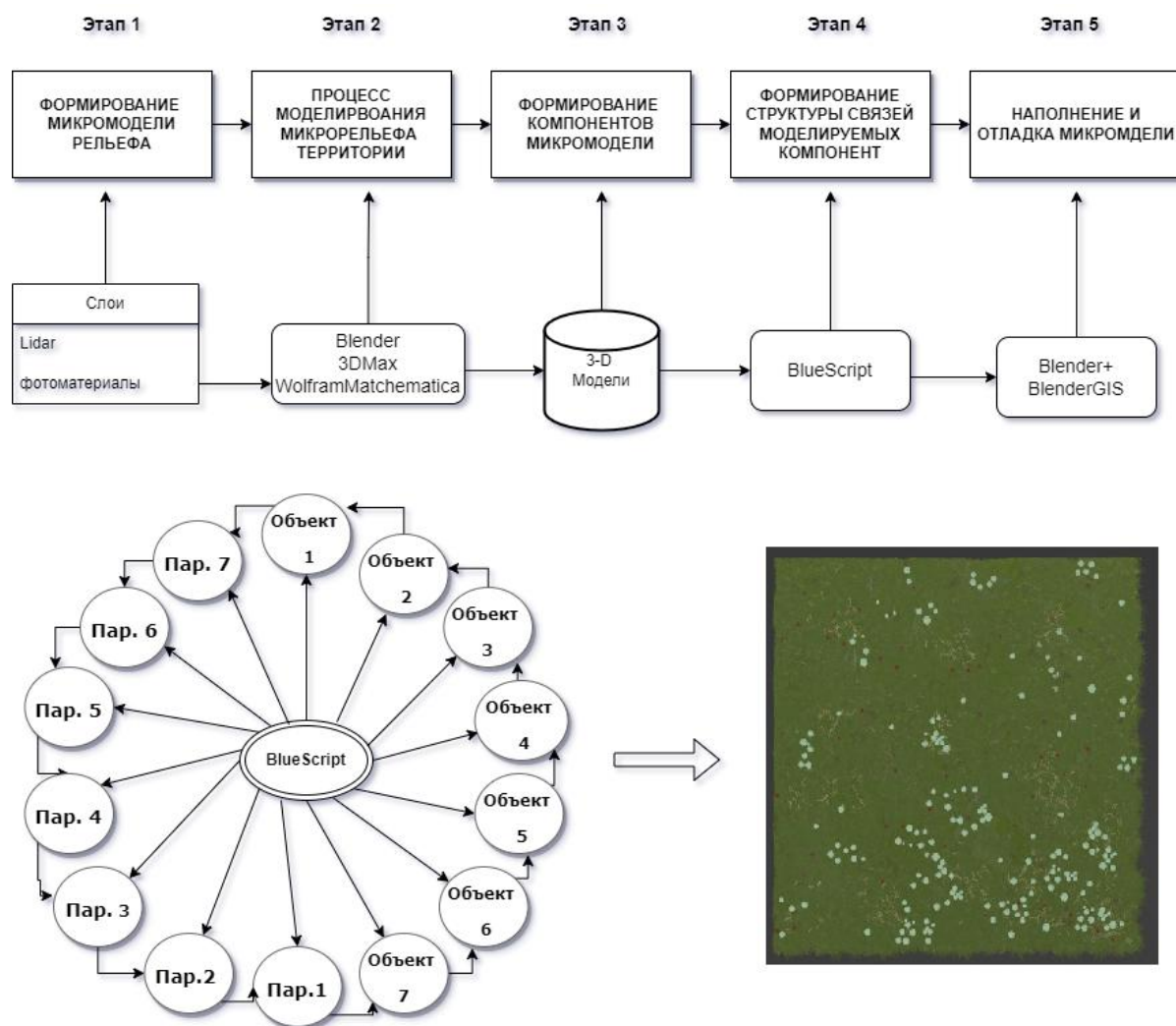


Рис. 93. Схема алгоритма формирования и компоненты цифровой трансформации преобразования данных в микромодель лесной экосистемы.

В основе алгоритма цифрового преобразования моделируемых данных в микромодели лесной экосистемы лежат схожие принципы и инструменты моделирования как в разработке дистанционной и макро-модели лесной экосистемы. Цифровая трансформация объектов в данном масштабе отличается тем, что в составе алгоритма дополнительно формируется структура связей

между моделируемыми компонентами, для этого используется языки визуального скриптинга.

3.8. Выводы по Главе 3

На основании выявленных потребностей процесса управления лесными землями установлено, что необходима методологическая база, способная стать надежной инструкцией для развития геопространственных технологий данного направления и возможностей их практического применения в лесной отрасли.

Предложены базовые параметры измеряемых величин для определения характеристик сложности и комплексности микромоделей лесных экосистем.

Геоинформационная модель лесной экосистемы и интегрированные в её состав данные позволят следить за динамикой лесных экосистем, формировать управленческие решения и перейти к этапу интервальных отношений, где по заданному алгоритму, возможно, следить в режиме реального времени за переходом на этапах жизненного цикла растений из одного класса в другой.

Произведено описание необходимого геоинформационного и технологического обеспечения процесса моделирования лесной экосистемы, при формировании геопространственных данных для геоинформационной модели.

На основании разработанного методологического подхода произведено формирование данных рельефа, дистанционного зондирования Земли для геоинформационного моделирования лесной экосистемы.

Разработаны геоинформационные модели лесных экосистем: дистанционная модель лесной экосистемы, макро модель лесной экосистемы, микро модель лесной экосистемы.

ГЛАВА 4.

ИНТЕГРАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В СРЕДУ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основное свойство, которым должна обладать геоинформационная модель лесной экосистемы это свойство комплексности, согласованности данных визуализации и атрибутивных данных. Система поддержки принятия решений строится при соблюдении таких условий, при которых достигается эффект полноценного восприятия поступающей геоинформации для лица принимающего решения. Так, можно заметить, что оценивая лишь визуальные характеристики древесной растительности сложно определить точные показатели запаса древесины, оценить её точный возраст, качественный состав. Однако, ещё в научной работе [240] было отмечено, что большой объём накопленной информации таксационных описаний является хорошей информативной базой для использования технологий машинного обучения в задаче инвентаризации лесных насаждений. Здесь можно отметить, что таксационные данные по своей структуре являются большими данными (BigData) [241] поскольку:

- содержать упорядоченную информацию;
- имеют признаки разграничения данных;
- могут быть переданы в различные среды обработки баз данных;
- имеют однородную и фиксированную структуру;
- имеют большой накопленный объём информации в динамике.

Для быстрого доступа к большим объемам данных требуются более эффективные методы структурирования и представления данных на пространственных платформах в режиме реального времени, требующие альтернативных и более простых методов интеграции баз данных [242]. Технологии и процедуры обработки визуализации трёхмерных данных проанализированы в научных работах [243-245]. Особенность представления

лесных тематических данных состоит в том, что при использовании классических геоинформационных систем контекстная информация, описывающая качественные характеристики насаждений, разделены от диалогового окна визуализирующего тематическую информацию.

Данное обстоятельство диктует условие разделённого взаимодействия обработки поступающей информации, при котором, лицо принимающее решение вынужден отдельно анализировать базы таксационных данных и отдельно анализировать картографическую информацию, что является технологически и инструментально не прогрессивным подходом в обработке геоинформации. Пренебрегать технологиями трёхмерной визуализации, основанными на более качественном уровне восприятия информации и для процесса анализа, такого сложного и многомерного пространственного объекта как лес, является сдерживающим фактором в развитии методов геопространственного представления данных, и как представления новых способов геоинформационного моделирования лесных экосистем, так и качественного управления самих лесных ресурсов.

В исследовании, для развития методологического аппарата применения геоинформационных моделей лесных экосистем как компонента практического управления, анализа и мониторинга участка леса возможен принцип, при котором геоинформационная модель лесной экосистемы содержит элементы, которые позволяют выделить геоинформационные модели лесных экосистем на качественно иной уровень взаимодействия пользователей со средой моделирования и управления. Если рассмотренные компоненты интегрированы в единую среду моделирования и анализа сведений, такой средой может выступить специальная геоинформационная система.

Первый компонент геоинформационного моделирования это данные дистанционного зондирования.

Второй компонент это трёхмерные модели основных экосистемных объектов.

Третий компонент – это визуализация атрибутивной информации о лесной экосистеме, интегрированной в состав геоинформационной модели с возможностью непрерывной обработки в режиме реального времени и на базе интеллектуального анализа данных. Тогда геоинформационная модель выступает как среда хранения и визуализации любой атрибутивной информации, включая и таксационную информацию.

4.1. Компоненты интеграции данных в геоинформационную модель

Среди технологий обработки информации средствами геоинформационных систем перспективными становятся технологии интеллектуального анализа данных [247-250], интегрированные в их функциональную среду. Процесс обработки больших объёмов информации в виде вывода итогового результата основных компонент визуализации геопространственных данных должны быть реализованы на базе отдельных программно-алгоритмических решений, не требующих при этом непосредственного участия лица, принимающего решения. Таким компонентом, который одновременно позволяет визуализировать информацию, агрегировать её и одновременно обрабатывать в потоковом режиме должна стать интеллектуальная геоинформационная система.

Интеллектуальная геоинформационная система имеет ряд не только стандартных задач присущих большинству геоинформационных систем, но и обладает следующими дополнительными возможностями:

- визуализацией трёхмерных геопространственных объектов с и их анализом;
- прогнозированием изменений свойств данных экосистем;
- параметрическим моделированием отдельных рассматриваемых элементов лесных экосистем;
- возможностью создания трёхмерных данных отсутствующих в составе подключаемых 3-d библиотек;

- динамической визуализацией изменений объекта геоинформационного моделирования в пространственно-временном аспекте.

Интерпретация, обработка и анализ геопространственной информации о состоянии лесных массивов позволяет осуществлять рациональное планирование и ведение лесного хозяйства. Концептуально новым подходом в сфере лесного хозяйства и сбора информации о лесе является, подход, основанный на применении совокупности ряда геоинформационных технологий, в том числе технологий на базе интеллектуального анализа данных [251].

Интеллектуальную геоинформационную систему можно представить как совокупность подсистем, образующих основное ядро системы (рис. 94).

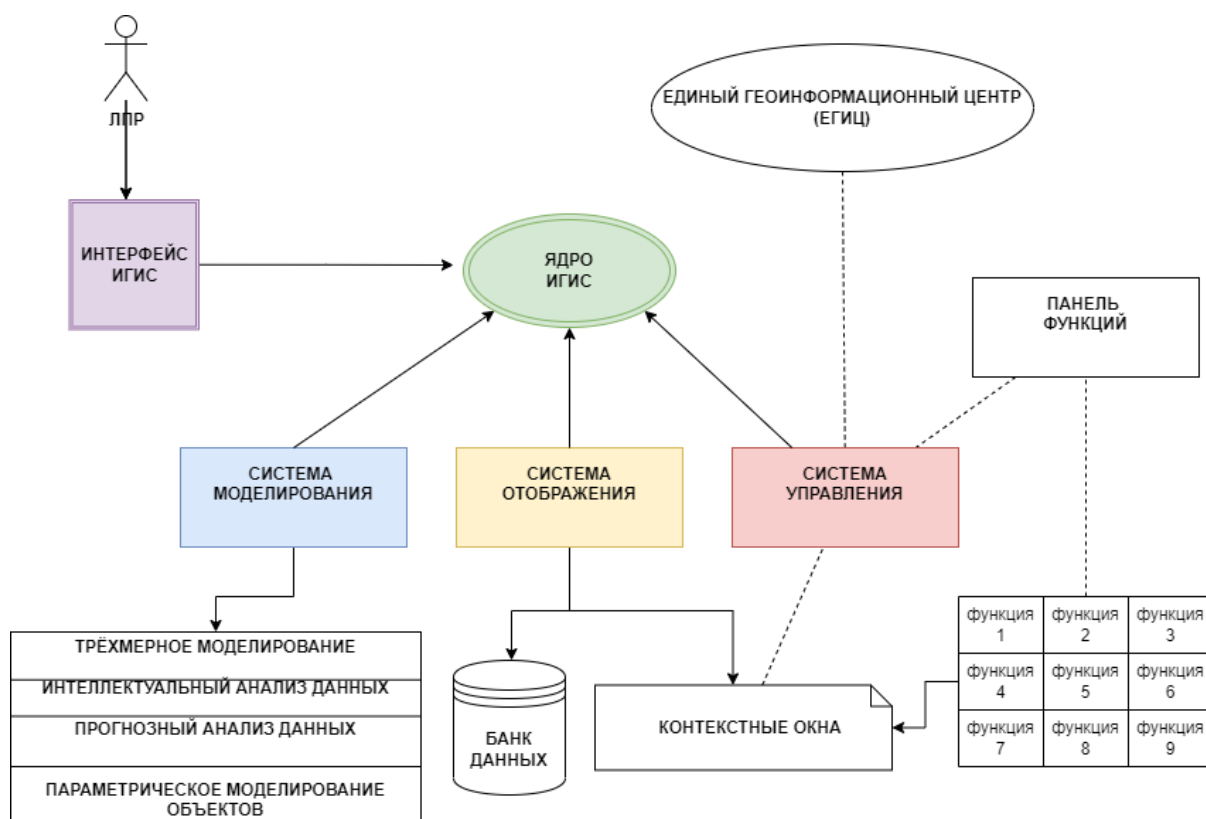


Рис. 94. Основные компоненты в составе интеллектуальной геоинформационной системы

Подсистема управления. В задачи подсистемы управления входит процесс обеспечения взаимосвязанных работ направленных на анализ сведений о состоянии лесной экосистемы. В основе построения эффективной системы управления, на базе анализа информации поступающей от геоинформационных

моделей лежит принцип определения ключевых задач на основе которых, создается функция обеспечивающая процесс поддержки принятия решения. Каждый компонент реализуемой функции представляет собой набор опциональных панелей в человеко-машинном интерфейсе системы управления. Реализация такого типа интерфейса, на основе которого возможно и управление и отображение многомерных геопространственных данных, это задача развития геоинформационных систем, всё больше содержащих в своей структуре не только стандартизированное отображение данных с их точной позицией, но и отображения предполагаемых изменений на базе сочетания технологий машинного обучения с трёхмерным объектом. Такой тип отображения геоинформации можно обозначить как динамическое отображение, принимая за динамику изменения объектов, новое свойство данных геоинформационных моделей. Определяя свойства объектов, закладывая в них функции поведения, достигается задача наглядного представления изменения исследуемого объекта с течением времени. Опираясь массивом данных целого участка леса возможно наглядное прогнозирование по интересующему признаку в интересах лица принимающего решения.

Подсистема управления отвечает за обеспечение функциональных возможностей и манипулированием конкретной моделью. Подсистема управления строится исходя из целевого сегмента модели. При использовании, например, в геоинформационной модели задач связанных с распространением пожара на территории леса, функции подсистемы управления должны отражать возможности по обеспечению изменений свойств характеризующих поведение модели при заданных условиях: направление пожара, его интенсивность, динамику распространения, влияние физики твёрдых тел в модели, для имитации его тушения. Поэтому, в составе подсистемы выделено 4 компонента: визуализация, интерфейс, функции, задачи (рис. 95).

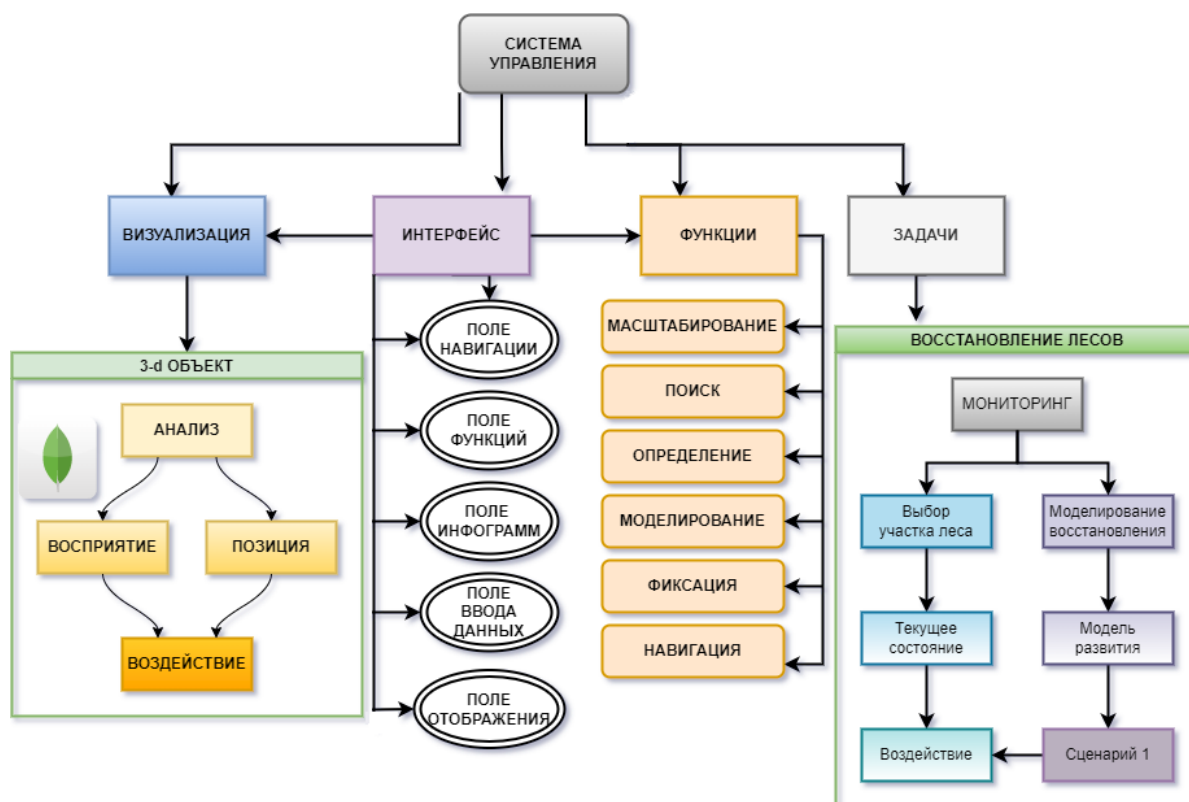


Рис. 95. Компоненты рлдсистемы управления

Подсистема отображения. Подсистема отображения геоинформации является компонентом от которого зависит визуальное формирование элементов необходимых для отображения лицу принимающему решения. Проектирование подсистемы отображения в составе интеллектуальной геоинформационной системы должно учитывать специфику работы с геопространственными и трёхмерными данными. Согласно назначению выбранной геоинформационной модели подсистему отображения можно настроить под конкретный тип задач. Так же, необходимо определить какую из задач выполняет подсистема отображения, если используется уже готовая геоинформационная модель, то в ней перечень задач проектирования должен быть минимизирован, а задачи связанные с управлением геоинформационной модели лесного участка расширены. К задачам по управлению лесными территориями можно отнести:

- проектирование лесохозяйственных мероприятий (рубок, противопожарных мероприятий);

- анализ сведений структуры трёхмерных насаждений интегрированных в модель;
- установление специальных обозначений в трёхмерном виде;
- многомерный анализ данных;
- параметрический анализ данных, установление одного параметра для анализа степени его влияния на другие.

Как правило, в геоинформационных системах за определённый набор исполнения упорядоченных действий отвечают специально прописанные микрокоманды, иногда для постоянной работы таких микрокоманд прописываются макросы. В открытой геоинформационной системе Quantum GIS или QGIS сообщество разработчиков, внедряет новые программные модули для решения определённого круга задач, с которыми сталкиваются пользователи. Однако, стоит отметить, что на анализ сведений, работоспособность, корректность отображения и изучения конкретного модуля, его совместимость с версиями используемой программы, требуется определенное время как для его освоения, так и отладки работы с определённой версией программы.

Для использования функций интерфейсной части технологий геоинформационного моделирования лесных экосистем возможно использование подхода организованного на базе полученного опыта от пользователя (*User Experience*). Такой подход подразумевает, что наиболее часто используемые и прикладные задачи, их функциональное отображение в системе разрабатывается с учётом быстрого доступа к исполняемой функции, наиболее качественному отображению данных, что значительно экономит время на поиск функций и последующий анализ сведений о системе. В качестве примера основных задач возможно построение схемы, показывающее точку зрения на связь основных элементов в системе отображения данных. Ещё в 2017 году в работе [117] были предложены некоторые подходы по изменению интерфейсов геоинформационных систем с классического отображения на интерактивное, что означает: использование прогрессивных стилей и дизайна диалоговых окон,

полей и функционала интеллектуальной геоинформационной системы, для упрощения взаимодействия пользователя со средой программных компонент. В качестве постепенного перехода в поле навигации по административным территориальным единицам в области управления лесами - лесничествам, возможно использование открытых данных лесоустроительной информации (рис. 96).

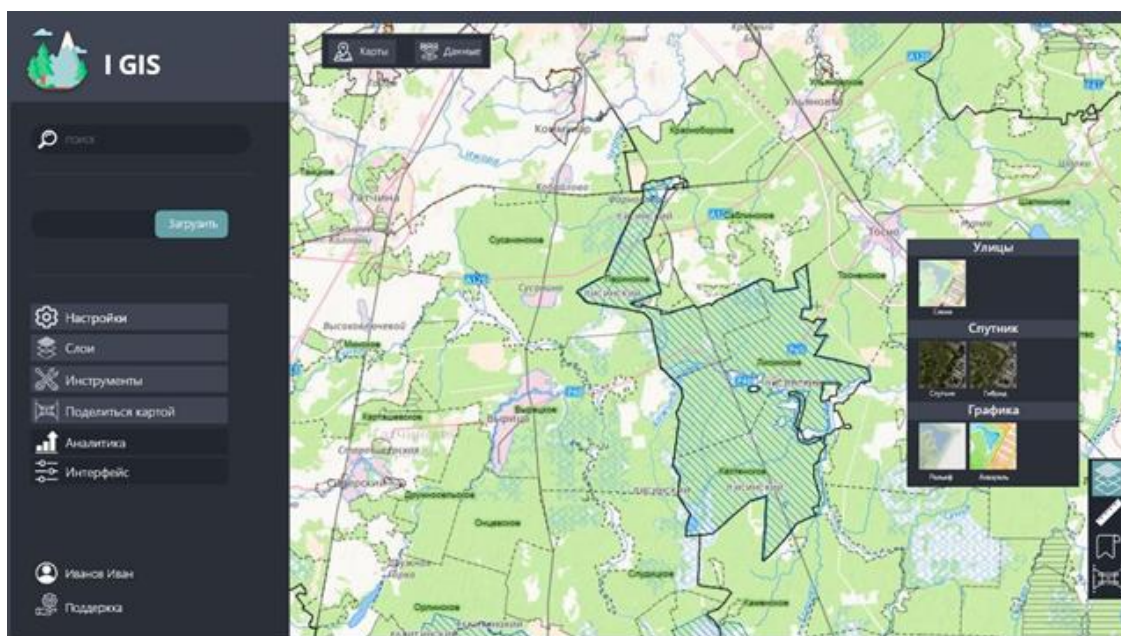


Рис. 96. Поле навигации в подсистеме отображения интеллектуальной геоинформационной системы, прототип интерфейса

После выбора конкретного лесного квартала возможен переход в 3-d режим, где выбранный квартал, в случае разработки его геоинформационной модели представлен в виде интерактивной трёхмерной карты с наложенными на него 3-d объектами (рис. 97). Такой способ перехода к нужным данным удобен и понятен, при входе в интерфейс программы сначала происходит поиск объекта по карте, затем выбор конкретного квартала, после чего открывается его геоинформационная модель. Можно обозначить, следующий факт, открытие 1 квартала сопровождается нагрузкой на вычислительный процесс аппаратного обеспечения в том случае, если исполняемая модель физически расположена на компьютере пользователя. В глобальном масштабе логичная реализация такого

способа отображения данных представляется в виде централизованных хранилищах и серверосторонней стратегией доступа к данным.



Рис. 97. Поле отображения геоинформационной модели лесного квартала

Подсистема моделирования. В задачи подсистемы моделирования входит процесс одновременного построения трёхмерных моделей и сведений о них на базе применения методов обработки поступающей информации. Здесь возникает сложность процессов одновременного отображения и таксационной и графической информации, поскольку структура данных гетерогенной информации требует логического разделения на легко воспринимаемые человеком формы. Однако возможен такой способ отображения данных о 3-d объекте, при котором при наведении на объект все характеристики в цифровой среде выбранного объекта будут отображаться частично, а при необходимости возможно полное отображение всех данных в расширенном состоянии (рис. 97). Данные процессы отображения поступающей и моделируемой информации, это задачи комплексного развития в сфере разработок пользовательских интерфейсов в геоинформационных системах. Важно отметить, что чем больше поступает сведений в геоинформационную модель, тем больше потребуется инструментов для отображения информации и её обработки.

Вторым компонентом работы подсистемы моделирования является отображение данных в виде динамических инфограмм (рис. 98).

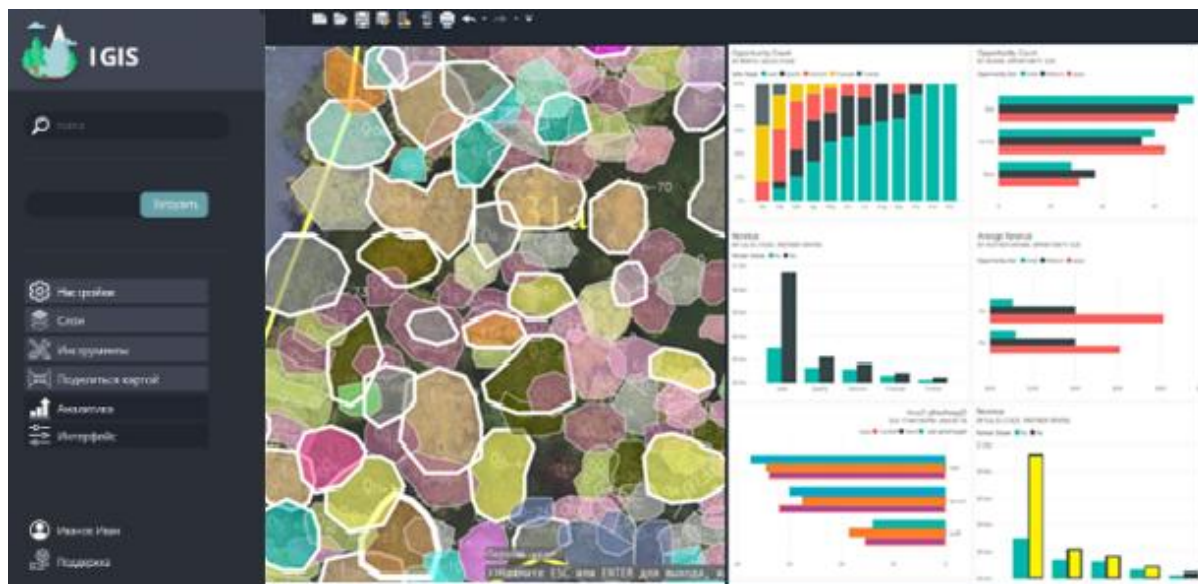


Рис. 98. Пример отображения моделей крон слева и информации о насаждениях справа, в одном поле интеллектуальной ГИС

Такие инфограммы могут отображать текущие и заданные параметры:

- хода роста насаждений выбранной породы;
- количество выбранных пород в определенном положении;
- построение ряда данных в модели на основе планируемого результата;
- анализ сведений, только выбранному объекту или группе объектов.

Под новым способом обработки поступающей информации на базе геоинформационных моделей понимается возможность одновременного проектирования моделей и возможность управления такими моделями. Для наиболее удобного взаимодействия данное сочетание можно объединить в одной системе - интеллектуальной геоинформационной системе. Задача такой системы, не только отображение геопространственной информации, но и геоинформационное моделирование и процедурная работа с пространственными геообъектами лесных экосистем и их интеллектуальный анализ.

4.2. Интеллектуальная геоинформационная система визуализации данных геоинформационного моделирования.

Раскрывая принципы построения разрабатываемой интеллектуальной геоинформационной системы, следует указать на уровни представления данных в системе. Система состоит из четырёх уровней представления информации:

1. Логический уровень – содержит логику процесса анализа данных и связь с другими функциональными уровнями, представленными в системе. На логическом уровне обработки информации основными элементами являются базы знаний, которые содержат в себе формализованные признаки, присущие, к примеру, насаждениям, ассоциативные понятия ключевых обрабатываемых значений (порода, выдел, границы, сухостой)[207].
2. Математический уровень – состоит из описания и формулирования алгоритмов анализа при помощи формул. К данному уровню можно отнести графики расчёта возраста спелости древостоя на базе определения средних параметров возраста и определения породного состава. Фактически на данном уровне может быть рассчитан запас насаждений, исходя из обрабатываемой информации.
3. Программный уровень – позволяет при помощи языков программирования перевести разрабатываемый функционал на программно-технический уровень представления системы. На программном уровне реализуется концепция всех уровней системы, исходя из определения наиболее подходящего способа программирования для каждой задачи. К примеру, процессы визуализации данных требуют реализации при помощи процедурных языков программирования, а логическая интерпретация данных является результатом обработки логического аппарата, реализуемого при помощи логического языка программирования. В совокупности среда разработки позволяет связать различные компоненты модулей программ через интерфейс разрабатываемой системы

4. Структурный уровень – схемотехнический уровень, требующий постоянного сопровождения происходящих процессов в системе для представления архитектуры, всех компонентов, раскрытия принципа работы алгоритмов. При разработке комплексной геоинформационной системы данный уровень представления информации на сегодняшний день должен находиться в состоянии постоянного изменения, и возможность его дополнения должна всегда оставаться открытой.

Таким образом, подход каскадной модели проектирования информационной системы недостаточен для реализации интеллектуальной ГИС. Подходящей моделью проектирования будет являться гибридная модель на базе итерационной и спиральной модели проектирования геоинформационной системы.

Решение задач с применением алгоритмов интеллектуальной обработки данных должно включать в себя следующие этапы:

- понимание задачи и требований к системе;
- классификация данных;
- предварительная обработка данных и выбор признаков;
- учёт требований к построению геоинформационных моделей лесных экосистем.

В качестве данных, с которыми будет работать интеллектуальная геоинформационная система, используются пространственные данные, снимки и метаданные. От формата данных зависит способ обработки геопро пространственной информации. Символьные данные, содержащиеся в базах данных, обрабатываются при помощи заложенных правил и запросов к этим данным; обработка графической информации с изображений происходит сложнее, что обусловлено самой структурой данных. Фактически, графические данные в виде пикселей являются двумерным массивом данных, однако представлен он изначально в виде одного набора данных в цветовой модели RGB. Трёхмерные данные фактически являются геометрическим контейнером, который сам по себе состоит из привязанных к нему свойств и атрибутов, более того, сама суть

наличия в модели трёхмерных данных отводится к получению информации исходя из геометрии объекта и анализа его морфологических особенностей.

Для построения адекватного алгоритма обработки информации необходимо наполнить систему метаданными. Применительно к задаче геоинформационного моделирования, метаданными являются все типы гетерогенных данных загруженных в среду геоинформационного моделирования.

Примечательно, что таксационные данные после их импорта в геоинформационную систему представляют собой хороший набор больших данных для их обработки и поиска зависимостей между ними.

При проектировании ИГИС необходимо включить в неё и пространственные данные (геоданные (координаты и атрибуты)): именно они и являются основой базы геоинформационной системы. Для системы, основной элемент управления которой - сложная пространственная модель, состоящая из целого набора разнородных данных, метаданные выступают как набор данных, в том числе трёхмерных данных.

Единицы пространственных данных таковы: точка, отрезок, полигон. Данные, которыми оперирует в процессе эксплуатации система, например, данные полученные при таксации леса: состав, преобладающая порода, возраст, класс бонитета, полнота, запас, тип леса, площадь выдела. Под данными, полученными со снимков, имеются в виду графические данные (разномасштабные снимки и фрагменты, экспортированные изображения покрытых лесов земель в web-картографических сервисов). Они могут быть представлены в растровом и векторном формате и определяются такими характеристиками, как дата и время съемки, место съемки, использованная камера, высота полета, направление съемки, масштаб и т.д. Эти характеристики помогают привязать полученный снимок к существующей карте, а также отслеживать динамику изменений при сравнении двух дистанционных материалов, снятых в разное время на одной местности. Под трёхмерными

данными понимается разработанные трёхмерные модели лесообразующих пород, описанных в Главе 2, но в состав 3-d моделей могут быть включены не только объекты, имеющие прямое отношение к лесу, вполне возможны требования к модели, где необходимо будет установка трёхмерных объектов инфраструктуры лесничества.

Разрабатываемая интеллектуальная геоинформационная система будет включать в себя такие возможности как:

- работа через мобильные устройства;
- он-лайн обновление данных;
- добавление и редактирование данных;
- интеллектуальный анализ данных.

Элемент связности в интеллектуальной геоинформационной системе достигается за счёт процесса настройки разных ключей (объекта к объекту) и присвоения связей в системе управления базами данных до момента начала обработки информации. Большое количество используемых данных (графические, текстовые форматы, пространственные данные) приводит к трудностям в выборе подхода к обработке данных. Различные типы данных требуют и различной ее обработки. Таким образом, интеллектуальная геоинформационная система должна включать технологию обработки гетерогенных данных, и в данном контексте наиболее удобным способом хранения разных типов данных может выступать реляционная серверная СУБД. Подход к обработке таких разнотипных наборов данных будет определён в рамках концепции баз данных, на основе её структуры и классификации (рис. 99).

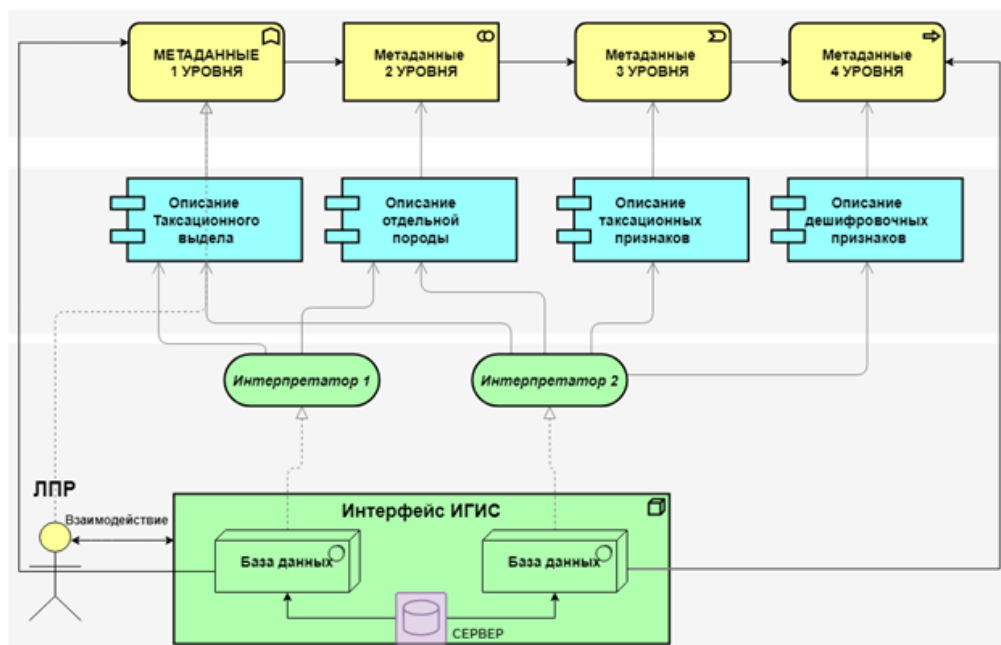


Рис. 99. Модель связей между метаданными и составляющими ИГИС

К шумам и выбросам в процессе обработки участка леса могут быть отнесены одиночно стоящие деревья, сухостои, безлесные пространства, недостатки при съемке (туча или тень) и т.д. Нетипичные объекты, т.е. объекты, не классифицированные в результате обработки снимков для построения, будущей геоинформационной модели, также являются элементами лесной экосистемы. Такие объекты в перспективе тоже могут быть формализованы, описаны и выделены в качестве отдельных элементов, после чего, данные элементы будут являться не выбросами, а классифицированной в результате обработки в системе составной частью геоинформационной модели.

Определение нетипичных объектов (шумов и выбросов) на снимке зависит от времени обработки снимка:

$$U = \{t_1 + t_2 + t_n \dots \},$$

где U – числовое значение показателя (номер объекта классификации);

t_1, t_2, t_3 – единицы измерения времени обработки за один выброс.

Для определения количества не определённых деревьев используется следующая формула:

$$U = U(Z) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

где U — количество исследуемых выбросов (не определённых деревьев),
 x - количества исследуемых объектов.

Следовательно, определение количества выбросов зависит от времени обработки и общего количества исследуемых объектов.

$Z(U)$ — функция зависимости, определения количества деревьев на снимке от длительности их обработки.

Слой данных основа геоинформационной модели лесной экосистемы. Однако в интеллектуальной ГИС слой могут быть результатами запроса к базам данных и результатами прогнозирования и моделирования. Такие слои, отражающие текущую ситуацию и наглядно демонстрирующие изменения, могут называться динамическими слоями карты. Такие слои могут быть реализованы за счёт использования инструмента прикладного программирования – API-карт. В качестве примера изменения текущих данных в интерфейсе системы на карте могут быть продемонстрированы изменения возрастной характеристики древостоев в связи с естественным отвалом старовозрастных пород (ели, сосны, лиственницы и др.) 7–8 класса возраста.

Кроссплатформенность в ГИС способствует росту количества оперируемых данных за счёт увеличения числа способов аппаратного взаимодействия пользователя с системой. Специфика разрабатываемой ИГИС состоит в решении задач обработки больших объёмов информации. К основным задачам относятся количественный и качественный учет леса. Для решения поставленных задач в геоинформационной системе необходимо использовать следующие функции:

Табл. 13. Основные задачи, решаемые при помощи ИГИС

Стандартные функции	Функции интеллектуальной обработки данных	Тип файлов	Источник данных
Загрузка лесных карт	Выделение эталонных объектов на карте	Слои	Карты лесничеств, планы лесонасаждений
Обработка карты	Создание динамических слоёв	Слои	Данные Дистанционного зондирования Земли
Манипуляции со слоями карт	Прогнозирование уязвимых мест возможной незаконной деятельности	Динамические	Данные дистанционного зондирования Земли, карты лесничеств
Добавление и редактирование данных	Обработка данных, их анализ и вывод на экран пользователя	Графики	Базы данных
Работа с геоинформационными моделями	Обработка геоинформационных моделей	3-d форматы	Библиотеки 3-d

В результате сформированы основные требования к реализуемой интеллектуальной геоинформационной системе и основные задачи, решаемые при помощи предлагаемой ГИС в сфере лесного хозяйства, создана базовая концепция системы, выбран подход к проектированию системы. Сделаны следующие выводы:

- Интеллектуальная геоинформационная система должна обладать полным и лёгким доступом к геопространственной информации.
- Система должна обладать возможностью модификации.
- Система должна обладать возможностью работы с гетерогенными данными
- Система должна обладать интерактивным интерфейсом учитывающим специфику работы в полевых условиях.
- Система должна обладать функцией интеграции дополнительных модулей.

- В системе должна присутствовать функция логического вывода и интерпретации сценариев.
- В системе должна существовать онтология связей и формализация основных метаданных.
- Система должна включать в себя процедурную модель знаний.

Аппаратная специфика работы с геоинформационными моделями лесных экосистем состоит в том, что для полноценной работы с таким объёмом информации на приемлемом уровне необходимы производительные вычислительные ресурсы. В состав работы с графическими объектами большое значение отводится графическому процессору, поскольку работа со сложными трёхмерными сценами требует подгрузки, как большого числа объектов для их отображения, так и постоянного рендеринга окружающей местности. В геоинформационных системах, наоборот стандартные картометрические операции и запросы к базам данным реализуются посредством нагрузки на центральный процессор. Как итог, получается объективное противоречие, с одной стороны существует необходимость обработки большого потока трёхмерной информации, но при этом, классическая архитектура стандартных ГИС целью которых изначально не являлось работа со сложными трёхмерными объектами не предназначена для этого. Техническим решением здесь может быть интеграция графического(игрового) движка в состав архитектуры интеллектуальной геоинформационной системы, поскольку именно архитектура трёхмерных пространственных данных предопределяет наиболее эффективный способ взаимодействия с геопространственными объектами в среде взаимодействия с использованием 3-d (рис. 100).



Рис. 100. Связь компонентов в модели управления

Следовательно, парадигма разработки геоинформационных систем должна измениться в сторону наиболее прогрессивного способа работы с пространственными объектами. Обусловлено это так же и всё большей виртуализацией многих процессов в медицине, науке, строительстве с использованием AR/VR технологий. Однако, в некоторых отраслях, например как лесное хозяйство, к настоящему времени технологии VR и AR практически не нашли потенциала и возможностей своего применения. Связано это с тем, что для адаптации таких технологий, необходимо пройти путь и выработку определённого опыта применения и использования трёхмерного моделирования в лесном хозяйстве и методов работы с трёхмерными геоинформационными моделями территорий. Для начала, использование 3-d карт? Как основного инструмента работы с данными в цифровой среде, что позволит со временем развить данное направление и перейти к наиболее интерактивным способам

взаимодействия с моделями на базе VR/AR технологий на втором этапе и постепенному переходу к голографическим технологиям.

Для развития данного направления были разработаны новые образовательные дисциплины, с описываемыми в данной работе методологическими подходами. В Институте леса и природопользования, в рамках реализации основной образовательной программы 09.04.02 - Информационные системы и технологии уровня магистратуры был введён новый курс - “Геоинформационное моделирование территорий”, а для уровня подготовки кадров высшей квалификации 1.6.20 Геоинформатика, картография - “Геоинформационное моделирование территорий”, уровень аспирантуры.

4.3. Библиотеки машинного обучения и их применение в задаче геоинформационного моделирования лесных экосистем

В качестве процедуры интеграции разнородных типов геопространственной информации необходим инструмент не только визуализации, но и сочетания такого способа представления атрибутивной информации, при которой она удовлетворяла требованиям специалиста проводящего анализ покрытой лесом земли комплексно. Анализ покрытой лесом земли заключается в оценке текущей ситуации и в оценке изменения, например, таксационных характеристик древостоя, хода роста насаждений за выбранный период времени. Для обработки такого большого количества информации возможно использование технологий машинного обучения и их интеграция в среду геоинформационного моделирования [252-256].

Машинное обучение — это совокупность вычислительных алгоритмов, которые предназначены для определения закономерностей в сложных системах, которые часто имеют нелинейные взаимосвязи данных, а также для создания точных предиктивных моделей. Технология геоинформационного моделирования может иметь в составе подключенный модуль интеллектуальной

обработки данных, в состав которого входят наиболее известные методы машинного обучения (рис. 101). Основная задача данных включенных в состав такой системы методов их применение для анализа выбранной площади и таксационных характеристик, обработка сведений и выработка решений.

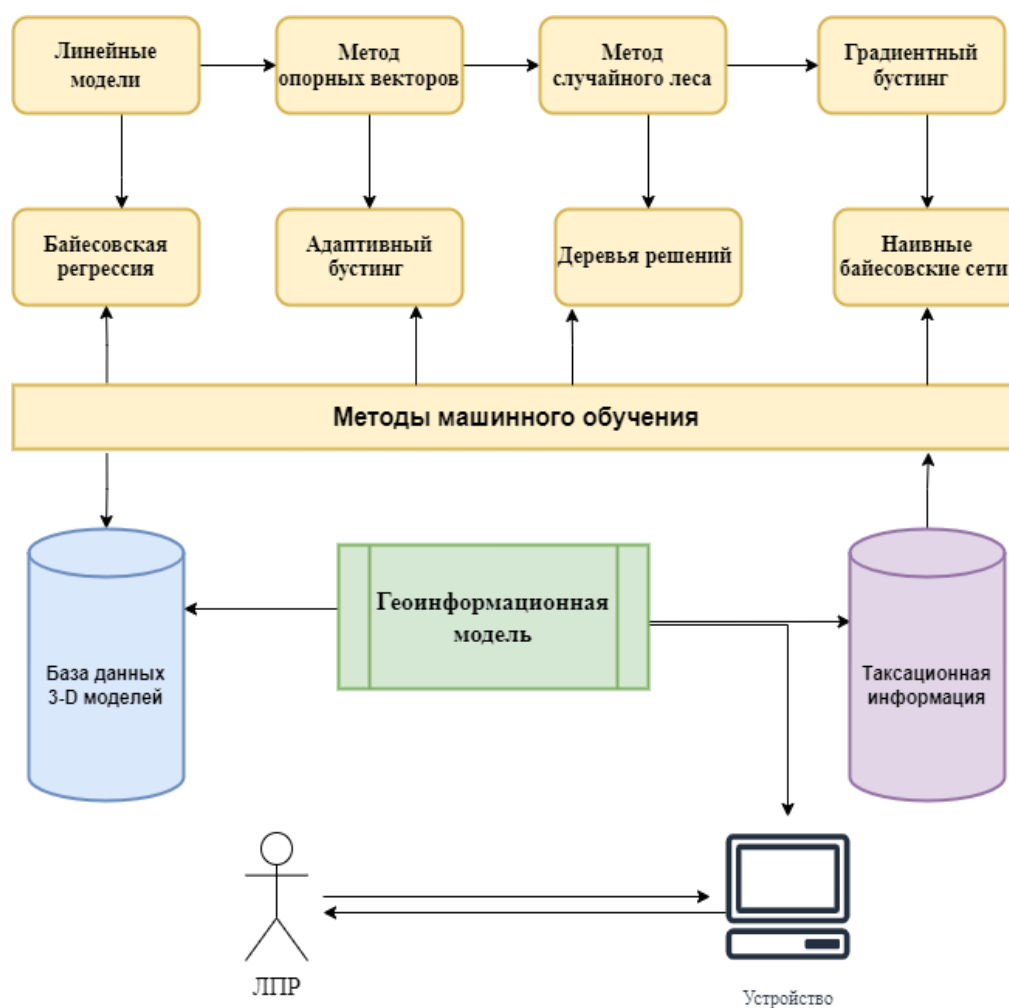


Рис. 101. Положение и связи методов машинного обучения

Технология моделирования таксационных показателей строится на базе технологий машинного обучения [257,258], интегрированные в состав геоинформационной модели процедуры машинного обучения являются системой интеллектуального анализа данных, как отдельный программный модуль в составе среды геоинформационной модели лесной экосистемы. На схеме (рис. 101) видно, что геоинформационная модель это агрегатор как баз данных 3-d моделей лесной растительности, так и таксационной информации, а методы машинного обучения способны обрабатывать практически любую

информацию, при условии правильного способа подготовки и подключения данных к последующему процессу обработки.

На базе машинного обучения создаются прогностические модели в виде вспомогательных диаграмм и инфограмм, которые, как правило, разделены от обрабатываемого массива данных, в нашем случае для восприятия комплексной позиции необходима и визуализация трёхмерной модели древостоя и отображение сведений обрабатываемой, например таксационной информации.

Задача отображения информации в геоинформационной модели состоит также и в том, чтобы обеспечить модель атрибутивной информацией, на основе которой можно оценивать, моделировать и строить сценарные события применительно к лесному участку.

К наиболее продуктивному способу отображения информации о состоянии лесного участка мы можем получить полные сведения таксации насаждений, характеристики количественного и качественного состава насаждений. Для этого возможен просмотр не только таблиц в виде стандартного набора данных, а применение такого инструмента как специальные языки программирования с встроенными библиотеками обработки данных. Языки программирования, в отличие от программных пакетов, очень перспективны и имеют следующие преимущества: более гибкие в настройке и в работе, более оптимизированы для обработки больших массивов данных, позволяют создавать готовые приложения под нужды определенных специалистов лесной отрасли, а также позволяют разрабатывать модели машинного обучения и нейросети для автоматизированного анализа данных, в некоторых случаях даже без помощи человека.

Для визуализации хода работы основной набор данных был представлен в виде .txt файла. Наиболее часто распространяемого формата хранения таксационных данных. В нём находились данные таксации Лисинского учебно-опытного лесничества от 2005 года. Необходимо было провести разметку и

группировку данных для дальнейшей работы с ними. Исследование включало в себя следующие задачи:

1)Перенести неразмеченные данные из формата .txt (рис. 102) в табличный удобочитаемый вид (в данном случае формата .xlsx)

2)Правильно сгруппировать данные, чтобы характеристики элементов леса учитывались в пределах одного выдела, при этом соотносились с другими таксационными показателями (для корректного проведения статистических анализов), например порода с ее возрастом, высотой, диаметром, бонитетом

3)Показать некоторые возможности визуализации и обработки данных при помощи языка программирования Python, также его библиотек Pandas и Seaborn.

Тестирование библиотек машинного обучения выполнялась с применением дополнительного программного обеспечения: Microsoft Excel для предобработки данных; среда разработки на языке Python - Jupyter Notebook, используемые библиотеки: Pandas, Seaborn [241, 301].

```

2 7E - 30 1 6 4 2 4 0.7 6 4 9
1.0 25 - 30 -- 8 4 -- 0С --- 1 ---
2005 10с - 30 7 10 6 1 А5 6 1 -
Единичные деревья
8Е -140 7 19 20 4 3 1
25 -110 -- 19 20 --- 1 2
19 4

```

Рис. 102. Исходный вид таксационных данных в .txt формате

При помощи библиотеки Pandas была произведена разметка данных из сплошного текста по столбцам и строкам, после чего производилась очистка данных и дублирование таких величин, как: бонитет, относительная полнота, тип леса и ТУМ для более легкого обращения к ним для каждого элемента леса в пределах одного выдела. Некоторые рассчитываемые данные из исходного набора были убраны в целях оптимизации последующей обработки: классы возраста, группы возрастов, запасы на выдел и хозяйственные распоряжения.

Для оптимизации работы в интегрированной среде разработки (IDE) для Python вся кириллица была заменена на латиницу. Всего было исследовано 100 кварталов и 1925 выделов. После подготовки данных можно приступить к их анализу (табл. 14).

Таблица 14. Пример выдела после разбивки, группировки и автозаполнения таблицы данных

Numb	Area	N	Por	A	H	D	M	B	P	T	U
1	0.8	5	Ель	90.0	27	28	137.500	1	0.5	КС	В2
1	0.8	3	Осина	100.0	32	40	87.500	1	0.5	КС	В2
1	0.8	2	Берёза	100.0	27	28	62.0	1	0.5	КС	В2

Название столбцов таблицы: Numb – номер выдела; Area – площадь выдела, га; N - единиц элемента леса; Por – порода; A – возраст породы, лет; H – высота, м; D – диаметр, см; M – запас, м³/га; B – бонитет; P – относительная полнота; T – тип леса; U – тип условий местопроизрастания.

Анализ таксационных данных. При помощи метода groupby() можно сгруппировать любую информацию по породам (или любым другим столбцам) и представить ее в виде таблицы. В данном случае за представленные значения в (табл. 15) приняты медианы. В качестве меры центральной тенденции можно использовать средние арифметические значения, взвешенные средние, усеченные средние.

Таблица 15. Медианные значения показателей, сгруппированных по породам

Порода	А, лет	Н, м	Д, см	М, м ³ \ га
Берёза	70.0	23.0	20.0	62.284483
Ель	80.0	22.0	22.0	64.705882
Липа	55.0	20.0	17.0	27.747253
Ольха черная	60.0	21.0	20.0	34.474886
Ольха серая	35.0	13.0	10.0	22.222222
Осина	75.0	26.0	28.0	52.380952
Сосна	90.0	24.0	26.0	73.333333

Анализ таблицы 15: значение возраста, характеризующие берёзу, равно 70 лет, значение высоты – 23 метра, а значение диаметра - 20 сантиметров. Запас – 62 кубометра. Далее, можем сравнить меры центральных тенденций - медиану и средние арифметические значения для одних и тех же показателей (табл. 16).

Таблица 16. Средние значения показателей, сгруппированные по породам

Порода	А, лет	Н, м	Д, см	М, м ³ \ га
Берёза	74.183722	20.752392	19.059809	81.705045
Ель	83.067926	19.826864	20.178754	97.986610
Липа	45.416667	15.416667	14.000000	26.676163
Ольха черная	72.684783	20.282609	19.869565	49.309953
Ольха серая	34.230769	12.240385	9.615385	29.397831
Осина	75.907188	24.020018	26.380346	91.075994
Сосна	100.553059	22.445693	25.126092	121.777241

Из приведенной выше таблицы видны усредненные показатели по лесничеству, что может дать общее представление об исследуемой территории. При желании, можно установить различные дополнительные фильтры, например, выбрать необходимые породы, их возраст, класс бонитета и другие показатели (табл. 17).

Таблица 17. Сгруппированные по высоте (от 15 до 30 м) средние таксационные показатели

Н, м	А, лет	D, см	M, м ³ \ га	B	P
15	51.433333	13.516667	65.744884	2.425000	0.667500
16	54.556701	13.958763	73.665454	2.371134	0.661458
17	55.222222	15.914530	81.566602	2.299145	0.705128
18	62.898058	16.815534	87.210918	2.344660	0.726341
19	66.295652	17.921739	91.376148	2.191304	0.736087
20	68.337553	19.308017	90.049195	2.105485	0.713502
21	77.071429	20.809524	100.735008	2.119048	0.709127
22	85.682171	21.612403	84.950311	2.085271	0.680103
23	88.318786	23.028463	100.344759	2.028463	0.671157
24	95.373057	24.314335	115.495580	1.956822	0.648359
25	93.295707	25.456280	108.953670	1.764706	0.648490
26	102.967936	27.016000	105.281987	1.744000	0.639400
27	111.339779	30.453039	96.379573	1.798343	0.616022
28	108.993056	31.805556	142.057245	1.684028	0.620833
29	110.540541	32.972973	117.175449	1.589189	0.619459
30	112.068966	35.275862	143.130056	1.362069	0.625862

Далее, группируем показатели по высоте. Выше, приведена часть таблицы с высотами от 15 до 30 метров. Сразу прослеживается закономерность: с повышением возраста повышается высота древостоя, его диаметр, запас и класс бонитета. Относительная полнота при этом снижается. Для подтверждения приведенных тезисов необходимо провести корреляционный анализ (табл. 18).

Таблица 18. Таблица коэффициентов корреляции

	A	H	D	M	B	P
A	1.000000	0.713719	0.795578	0.088581	0.058402	-0.314013
H	0.713719	1.000000	0.922839	0.124569	-0.406074	-0.024298
D	0.795578	0.922839	1.000000	0.108274	-0.246185	-0.137002
M	0.088581	0.124569	0.108274	1.000000	-0.058451	0.084672
B	0.058402	-0.406074	-0.246185	-0.058451	1.000000	-0.165263
P	-0.314013	-0.024298	-0.137002	0.084672	-0.165263	1.000000

Сильная положительная связь (0,92) существует между диаметром (D) и высотой (H), что говорит о том, что при увеличении значения одной переменной происходит увеличение значения второй. То же можно сказать и про возраст (A) и высоту (H) древостоя, но связь имеет менее выраженный характер (коэффициент корреляции 0,71). Между бонитетом (B) и высотой (H) существует слабая отрицательная связь (-0,41), это означает, что при увеличении значения одной переменной значение второй будет уменьшаться и наоборот.

Библиотеки языка программирования Python имеют большую функциональность в области визуализации данных. Из-за очень гибкой настройки группировки данных, недоступной в некоторых других распространенных программных пакетах по обработке и анализу данных, можно создавать очень информативные и в то же время простые графики. Особенность данного типа отображения информации состоит в возможности её интеграции в среду геоинформационного моделирования, что позволит дополнить геоинформационные модели аналитическими сведениями обрабатываемой таксационной информации.

Сначала построим гистограмму распределения диаметров по всем породам на всех исследуемых выделах (рис. 103). Всего значений диаметров – 5741. По

кривой на графике, видно что распределение имеет колоколообразный вид, очень похожее на нормальное (рис. 104).

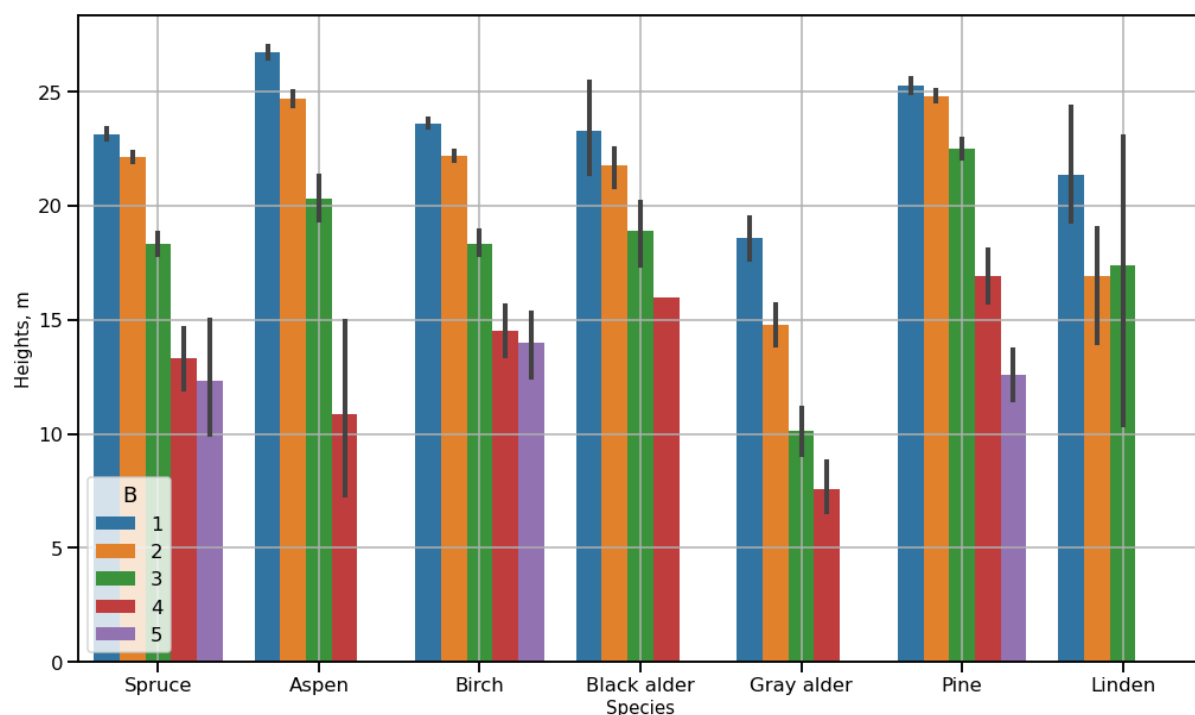


Рис. 103. Гистограмма распределения высот по породам и бонитетам

Сноска “В” – классы бонитета. Бер – берёза, Ел – ель, Лип – липа, Олch – ольха черная, Оls – ольха серая, Os – осина, Sos – сосна

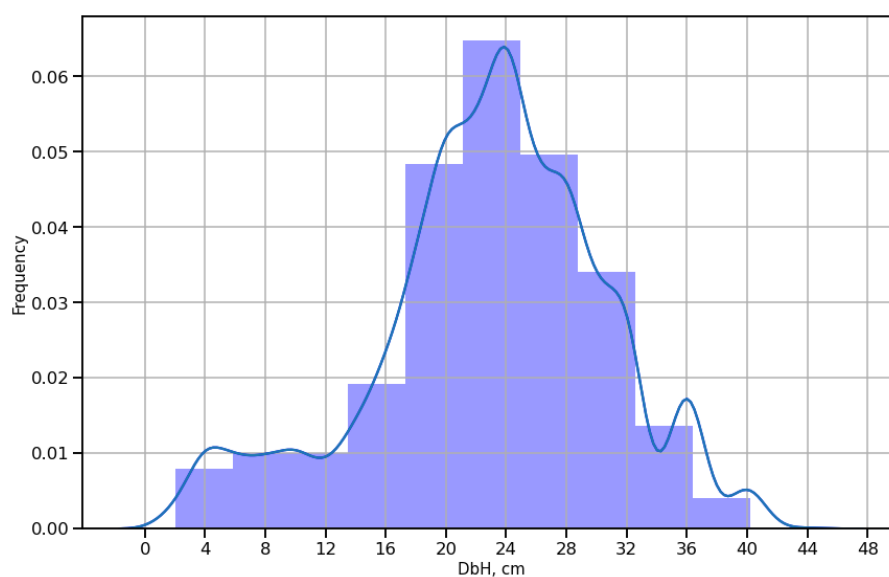


Рис. 104. Гистограмма распределения диаметров пород

Для наглядности наличия корреляционных связей построена тепловая карта (рис. 105).

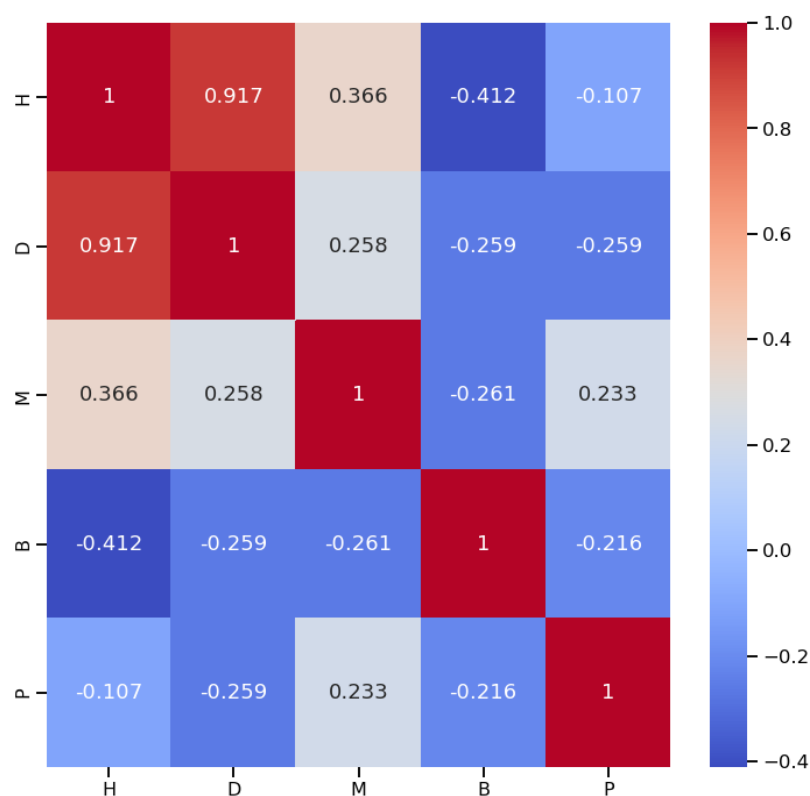


Рис. 105. Тепловая карта корреляционных связей между различными показателями

Если сгруппировать средние диаметры по высотам и построить график, то можно получить пример линейной регрессии для исследуемой территории между двумя показателями, на котором, видно силу связи между изучаемыми переменными (рис. 106).

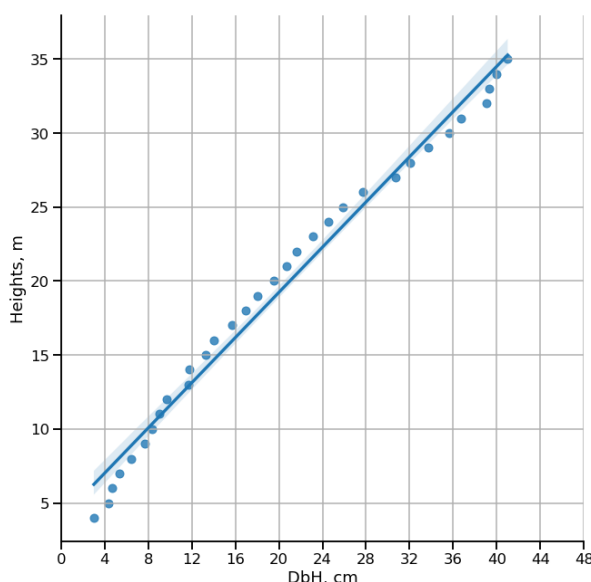


Рис. 106. Линейная регрессия на графике

Язык программирования Python и его библиотеки позволяют эффективно подготавливать данные на начальном этапе для дальнейшей обработки. После чего, можно анализировать большие объемы данных, а результаты исследования визуализировать. Преимущество обработки данных на Python также заключается в том, что все производимые вычисления можно перенести на сервера для удаленной обработки данных, что позволяет ускорить процесс изучения и использования собранного материала в лесной отрасли. Именно такой способ визуализации по обработке таксационной информации выбранного участка местности можно представить после выбора интересующей нас геоинформационной модели (рис. 107). Примером такого отображения данных является представление всех полученных выше графиков и дополнительного динамического слоя выбранных пород на выделе и гистограммы расчетов запаса древесины выбранных пород одновременно.

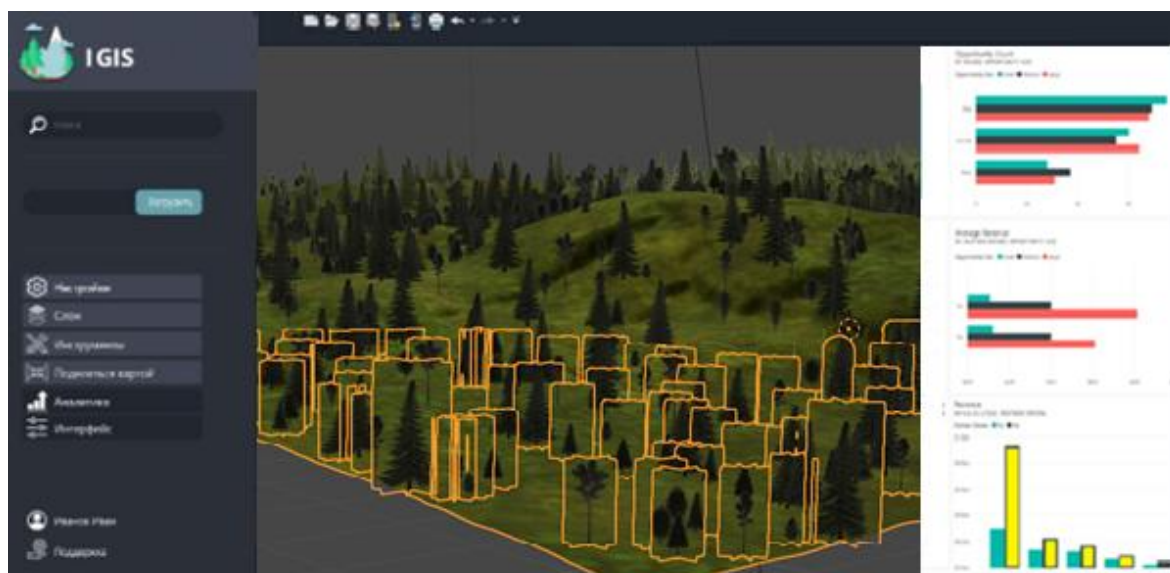


Рис. 107. Пример интерактивного отображения анализа данных трёхмерной модели лесной экосистемы в интеллектуальной геоинформационной системе

Геоинформационные системы, используемые в системе лесного хозяйства, являлись удобным инструментом визуализации и обработки данных. На сегодняшний день следующий этап в развитии методов обработки динамически меняющейся информации – это интеллектуальный анализ геопространственных данных. Он подразумевает не только процесс обработки оперируемой информации, но и построение сложных процедурных моделей. На основе проведённой обработки данных к ним относятся логистические и эвристические методы рассуждения, заложенные в концепцию работы новых интеллектуальных геоинформационных систем в составе единого геоинформационного центра.

Интегративный подход с визуализацией данных позволяет сделать вывод на основании выбранных геопространственных элементов, оценить не только их численные характеристики, но и визуальные характеристики, пространственное расположение, структуру и качество, что вполне полезно при планировании и назначении хозяйственных мероприятий в лесах с точки зрения управления территорией покрытой лесом. Однако здесь возникает вполне логичное заключение, насколько данная модель отражает участок, расположенный в натуре. Для этого необходим определенный механизм и методика верификации геоинформационных моделей лесных экосистем.

4.4. Верификация геоинформационных моделей лесных экосистем

Во 2 Главе диссертационной работы был введен признак точности геоинформационных моделей лесных экосистем. Признак характеризуется определением показателя достоверности геоинформационной модели (G). Формула расчёта показателя G определяется посредством расчёта измеряемых величин и имеет следующий вид:

$$G_j = \sum_{i=1}^N \frac{K_{ij} * P}{S_j}$$

где, $i \in [1, \dots, N]$ - количество моделируемых пород деревьев,

где N – количество пород моделируемых деревьев

$j \in [1, \dots, D]$ количество территориальных единиц, где D число территориальных единиц моделирования.

K_{ij} – количество рассчитанных деревьев породы i в территориальной единице j

P – коэффициент точности дистанционных материалов $p = [0,5,09]$

$S_{jга}$ – площадь модели в гектарах для каждой территориальной единицы

Данная формула может быть представлена в следующем виде, обозначим ее как:

$$O_j = \sum_{i=1}^N K_i$$

O_j – общее количество всех пород деревьев для заданной территориальной единицы j

Для оценки достоверности рассчитываемого показателя G необходимо провести статистический анализ данных данного показателя. В данном исследовании за основу геоинформационного моделирования используются лесообразующие древесные породы 196 квартала, расположение которых в пространстве определены, по внешним признакам на изображениях, полученных с данных дистанционного зондирования Земли, web-картографических сервисов

и БЛА, определена и видовая принадлежность, расчет количества деревьев проведен с использованием алгоритма вычисления центра кроны дерева. Для оценки доверительного интервала полученной величины G необходимо провести анализ расчета доверительных интервалов, для этого в исследовании нами определено проведение расчета показателя G по 40 кварталам (административно-территориальных единиц) Лисинского участкового лесничества, расположенных в пределах Учебно-опытного лесничества, филиала СПбГЛТУ имени С. М. Киров, начиная с .

При работе с доверительными интервалами часто используют два термина. Уровень значимости α - это вероятность, с которой значение параметра не попадает в доверительный интервал. Уровень доверия $\beta = 1 - \alpha$ - это вероятность того, что доверительный интервал накрывает значение параметра. Обычно уровень значимости равен 0.01, 0.05, 0.1, что соответствует уровню доверия 0.99, 0.95, 0.9. Очень часто уровни значимости и доверия измеряются в процентах, то есть уровень доверия 0.99 и 99% - это одно и то же.

Определение. Пусть задано малое число $0 < \alpha < 1$. Интервал со случайными концами $(\theta_1; \theta_2)$ называется доверительным интервалом для параметра θ с уровнем доверия $1 - \alpha$, если для любого $\theta \in \Theta$ $P(\theta_1 < \theta < \theta_2) \geq 1 - \alpha$.

Если распределение генеральной совокупности имеет конечные математическое ожидание и дисперсию, то при $n \rightarrow \infty$ основные выборочные характеристики (среднее, дисперсия, эмпирическая функция распределения) являются нормальными.

Рассмотрим случайную выборку объема n , вычислим среднее значение $\bar{x}$ по выборке и зададим уровень доверия β .

- Доверительный интервал для среднего имеет вид $(\bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta)$, где Δ - это точность интервальной оценки.
- Пусть нам известно стандартное отклонение σ генеральной совокупности.

- Тогда $\Delta = \sqrt{\sigma} \cdot z_{\alpha/2}$, где $z_{\alpha/2}$ - это квантиль нормального распределения уровня $1 - \alpha/2$

Теорема. Доверительный интервал для среднего с известной дисперсией имеет вид $(\tilde{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2}; \tilde{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2})$

Если выборка больше 40, но стандартное отклонение нам неизвестно, то вместо σ мы будем использовать выборочное стандартное отклонение

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2}$$

Доверительный интервал для среднего при неизвестной дисперсии, но большой выборке ($n > 40$), имеет вид $(\tilde{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2}; \tilde{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2})$.

Для нашего случая:

Доверительный интервал $G_{\text{ср}} - \Delta G < MG < G_{\text{ср}} + \Delta G$

$\Delta G = t_{\text{кр}} (\sigma / \sqrt{N})$

$G_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое

M_G – медиана для G

σ – стандартное отклонение G

L – длина исходного ряда G

Рассчитана описательная статистика, основные показатели ряда, (табл. 19).

Таблица 19. Основные статистические показатели показателя G .

Среднее	187,7227
Стандартная ошибка	12,01364
Медиана	164,0698
Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	75,98093
Дисперсия выборки	5773,102
Эксцесс	-0,933
Асимметричность	0,447607

Интервал	287,3795
Минимум	69,00258
Максимум	356,3821
Сумма	7508,908
Счет	40

Рассчитаны границы доверительного интервала (табл.20).

Таблица 20. Основные статистические показатели показателя G.

$G_{cp} - \text{дельта}G < G < G_{cp} + \text{дельта}G$		
149,515	< G <	225,929

На графике (рис. 108) границы доверительных интервалов для каждого квартала показателя G.

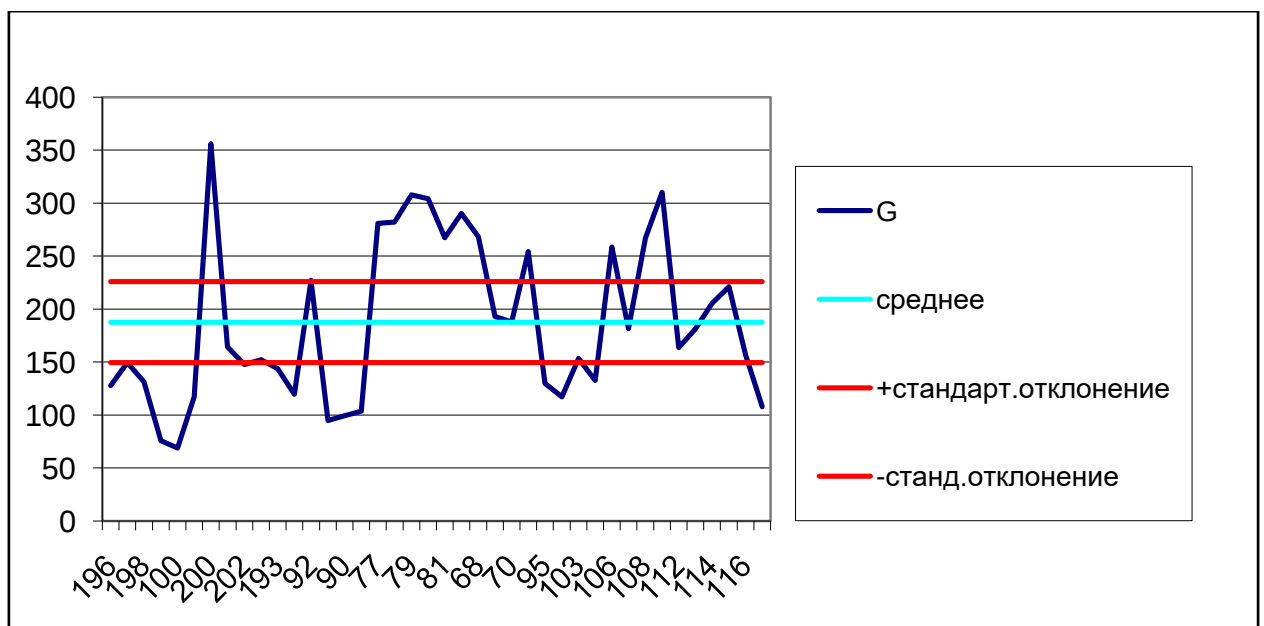


Рис. 108. Границы доверительных интервалов показателя G

Можно выделить несколько аномальных значений, положительных (около 200 по оси x) и отрицательных (около 100 по оси x) это наибольшие

аномалии. Связано это с тем, что в данных кварталах подрост насаждений переходил в сомкнувшиеся лесные культуры в связи с естественным ростом и изменился на спутниковом снимке, следовательно, данные насаждения учитывались при подсчёте количества деревьев, что отразилось в аномальных значениях и повышением тренда на графике. Часть из обрабатываемых данных не изменилась. Среднее стандартное значение показателя G находится в границах от 149 до 226 условных единиц.

4.5. Выводы по Главе 4

Для эффективного управления лесами, первостепенной задачей в лесном хозяйстве является процесс сбора информации о лесном фонде. Только обладая полной, актуальной информацией о состоянии лесных ресурсов, можно выстроить полноценную методику управления и учёта такого важного для планеты ресурса как лес. На настоящий момент материалы проводимого ранее лесоустройства и материалы государственной инвентаризации лесов не обеспечивают полнотой, достоверностью и точностью по оценке лесных ресурсов. Площади лесоустроительных работ значительно ниже, чем ранее проводимое лесоустройство в советское время. Данные обстоятельства требуют необходимости применения новых методов в обработке геопространственной информации о лесных экосистемах и исследования технологий интеллектуализации анализа данных.

В рамках диссертационного исследования в 4 Главе были рассмотрены вопросы интеграции различных методов для использования их в составе геоинформационных моделей лесных экосистем, так и вне их. Раскрываются компоненты интеграции данных в геоинформационной модели, на основе базовых компонентов описываются подсистемы входящие в составную часть интеллектуальной геоинформационной системы визуализации данных геоинформационного моделирования. Данная система является инструментом

способным объединить в себе важные технологические составляющие процесса геоинформационного моделирования, визуальную часть, часть связанной с обработкой геопространственной информации, на примере таксационных данных и часть связанной с процедурой обработки данных библиотеками машинного обучения и их применения в задаче геоинформационного моделирования лесных экосистем. На основании наиболее известных методов проведена верификация геоинформационных моделей лесных экосистем.

Однако, использование интеллектуальной геоинформационной системы определяет принцип централизованного управления, хранения и обработки новых геопространственных форматов данных. В основе использования и систематизации полного цикла получения, хранения и многоцелевого доступа к таким данным, необходим инфраструктурный элемент, объединяющий в себе, как технологическую составляющую, так и аппаратную. Таким центром ,объединяющим в себе все составные технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем может выступить предлагаемая концепция единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством.

ГЛАВА 5.

ЕДИНЫЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ НА БАЗЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

На основе сформированной технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем, возникает потребность в таком инструменте управления геопространственной информацией о лесных массивах, в котором существует возможность отображения и визуализации всех материалов для достижения цели контроля и воздействия на лесные экосистемы.

Цикл использования технологии геоинформационного моделирования возможно реализовать на базе предлагаемого центра в задачи которого входит управление лесной территорией.

Создание такого единого геоинформационного центра (ЕГИЦ) можно обосновать следующими положениями:

1. В структуре такого центра достаточно легко можно объединить функциональные особенности распределенных геоинформационных систем и данные, расположенные на различных серверах сети Internet и использовать все доступные сервисы облачных технологий.

2. Отпадает необходимость тиражировать данные и программное обеспечение для ЕГИЦ, их обновление выполняется на местах у держателей той или иной информации и разработчиков программного обеспечения, где осуществляется администрирование, как данных, так и программ в рамках технической поддержки соответствующих серверов.

3. Взаимодействие пользователей с геоинформационной средой центра становится унифицированным, т.к. для работы приложений на клиентском компьютере используется стандартный WEB – браузер, со встроенным картографическим компонентом.

4.Простота установки программного обеспечения клиента, которое может устанавливаться (или обновляться на более новую версию) автоматически при входе на Internet-страницу, на которой расположен тот или иной ГИС ресурс.

5.Расширяется возможность обработки и отображения разноформатной информации: растровых и векторных карт, рельефа, 3D объектов, аэрофото и космоснимков, сферических панорам, объектов виртуальной (VR) и дополнительной (AR) реальности, 2D и 3D фигур, условных обозначений, закладок, надписей.

6. Проводится агрегирование информации, поступающей от внешних источников: средств дистанционного зондирования земли, видеокамер, GPS/Глонасс датчиков положения мобильных объектов, мониторинговых параметров окружающей среды от датчиков беспроводных сенсорных сетей и других измерительных приборов.

7.Используется единая среда и инструментальные средства обработки и отображения информации пространственных данных отрасли или региона.

8.Осуществляется автоматический анализ поступающих данных о лесном фонде и прогнозирование развития ситуации.

9.Проводится расчет оптимальных вариантов действий и формирование извещений о событиях, требующих внимания.

10.Формируются команды управления и сообщения на другие уровни системы.

11.Создаются при необходимости, территориально распределенные иерархические системы управления с единой информационной средой и технологиями взаимодействия.

5.1. Структура единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством

Большая площадь покрытой лесом в Российской Федерации более 750 миллионов гектар земель лесного фонда, слабое техническое обеспечение на удалённых территориях лесничеств и отсутствие развитой инфраструктуры, предопределяет подход построения единого геоинформационного центра при централизованном управлении и терминальном доступе к функциям обработки, сбора и мониторинга данных покрытых лесом земель. Вторая важная составляющая - разработка отечественной методологии стратегическим управлением таким природным ресурсом как лес на основе единого геоинформационного центра. Такой комплекс может стать, как альтернативой по управлению лесными землями, так и дополнительным звеном для процесса обеспечения рационального использования и мониторинга лесных ресурсов. В структуру такого центра можно включить следующие компоненты (рис. 109).

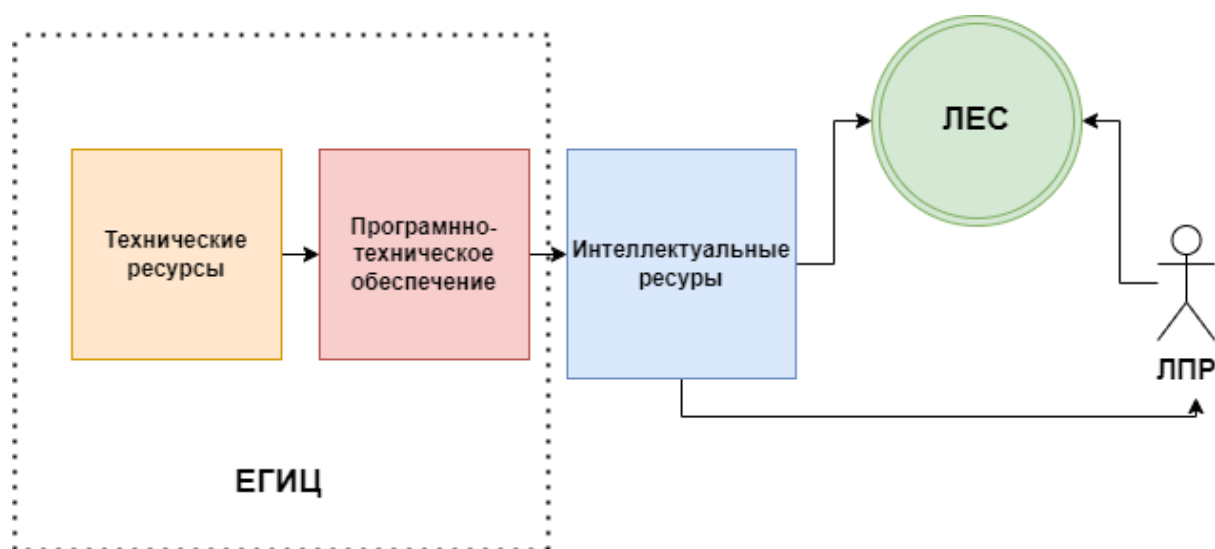


Рис. 109. Структура ЕГИЦ

Таким образом, состав единого геоинформационного центра определяется наличием заинтересованных сторон для обеспечения цели субъекта управления. Можно отметить, что центр объединяет в себе все компоненты, участников процесса геоинформационного моделирования. К понятию инфраструктурной части такого центра относятся: ресурсы, программно-техническое обеспечение, интеллектуальные ресурсы.

Ресурсы. Технические ресурсы, которые являются интрументарной базой для развёртывания в центре тактико-технологических элементов. в их составе, находятся рабочие станции, сервера, сетевое обеспечение.

Программно-техническое обеспечение. В состав программно-технического обеспечения может входить описанное в 3 Главе диссертации весь комплекс технологического и геопространственного обеспечения, в который входят средства сбора информации о лесных ресурсах (беспилотные летательные аппараты, устройства).

Интеллектуальные ресурсы. Вне зависимости от организационной структуры работы центра, конечным исполнителем и потребителем информационных потоков является лицо принимающее решение. К интеллектуальным ресурсам следует отнести лиц задача которых связана с систематизацией геопространственной информацией и обеспечением процессов геоинформационного моделирования лесных экосистем.

Предпосылками к созданию центра являются:

- 1) Необходимость реструктуризации деятельности систематического обновления информации о лесном фонде;
- 2) Появление новых геопространственных форматов данных;
- 3) Возможность накопления фотоизображений за разные временные периоды полученных аэрокосмическими средствами;
- 4) Возможность создания геоинформационных моделей территорий.

5.2. Система связей элементов единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством

Инфраструктуру единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством будем строить исходя из представленного обоснования.

Рассматривая ЕГИЦ как объединяющую платформу в ее состав можно включить следующие подсистемы (рис. 110), причем номенклатура систем,

включаемых в будущем в состав ЕГИЦ ограничивается только потребностью их использования в управлении лесным хозяйством.

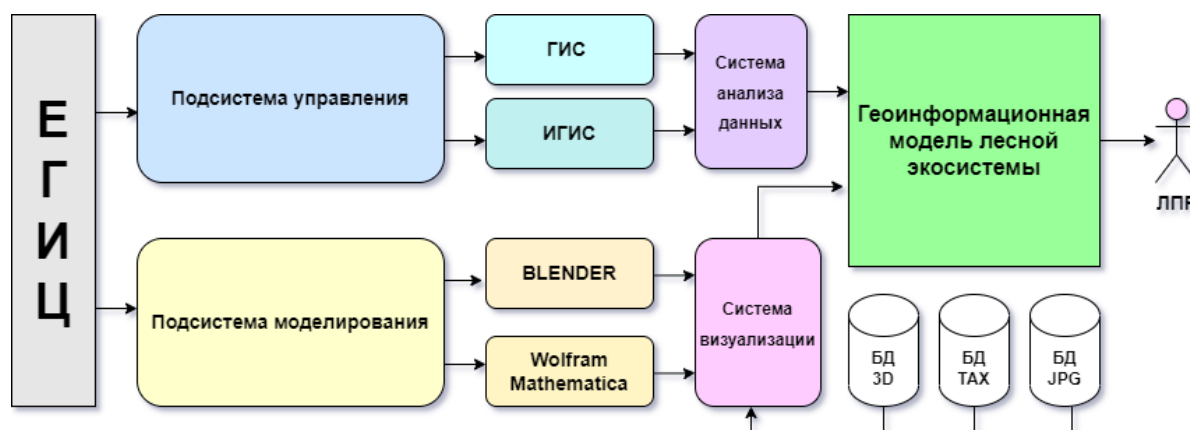


Рис. 110. Возможный состав систем на платформе ЕГИЦ

Платформа ЕГИЦ позволяет объединить также различные типы данных лесного фонда для последующей обработки информации различного вида и источников для принятия управленческих решений (рис. 111).

Основные требуемые задачи в лесном хозяйстве на базе получаемых сведений:

- отображение данных по запросу
- отображений сведений количественного и качественного состава лесов
- отображения инфограмм, характеризующих сведения породного состава лесов
- анализ сведений по запасам древесины
- детальный осмотр модели лесного квартала
- нанесение на карту местности характерных сведений
- отображение лесопатологических сведений
- отображение данных о лесных пожарах
- визуализация распространения природных явлений в лесу.

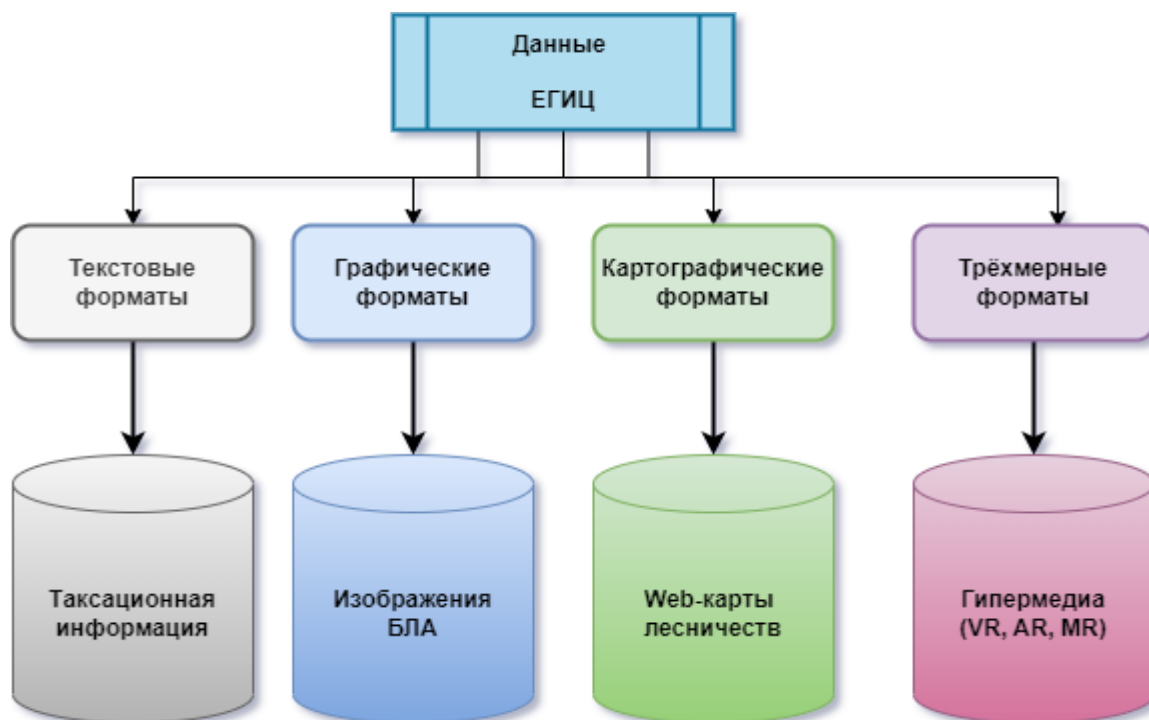


Рис. 111. Основные типы данных в ЕГИЦ

Аппаратно – программная реализация ЕГИЦ предполагает различные клиент – серверные конфигурации построения, среди которых предлагается наиболее популярная из них «серверосторонняя» стратегия. Стратегия обеспечивает управление единым геоинформационным центром. Управление реализуется посредством общей программной системы управления.

Эта стратегия ориентируется на предоставлении данных любых форматов и типов или результатов их анализа в режиме "по требованию" от специализированного сервера, имеющего, в свою очередь, доступ к базам данных и приложениям их обработки других систем интегрированных в ЕГИЦ. Для такой стратегии характерна следующая последовательность процедур:

1. пользователь формирует запрос в интерфейсе web-браузера;
2. запрос по протоколу HTTP, или используя технологию web socket, посылается на сервер;
3. сервер обрабатывает запрос и формирует ответ;
4. ответ возвращается по сети Интернет пользователю и визуализируется с помощью приложения в web-браузере.

Результаты запроса, которые возвращаются с сервера, включают в себя координаты пространственных мониторинговых объектов и набор их атрибутов. Результаты отображаются на карте в виде интерактивной графики и описательной информации, с которой работают конечные пользователи.

Обоснование такого способа реализации заключается в том, что при использовании программного обеспечения с функциями работы посредством web-браузера вычислительные операции выполняются на стороне сервера, что позволяет снизить требования к аппаратному обеспечению на стороне пользователя, что является важным подходом информационного обеспечения в лесной отрасли, учитывая низкий уровень регионального технического обеспечения лесничеств.

Здесь одновременно (или поочередно) в выпадающих окнах отображается как информация о состоянии узлов, так и результаты мониторинга с привязкой к конкретному месту лесной территории.

Эти данные также используются для автоматической оценки пространственного и взаимного расположения узлов, что позволяет легко встраивать получаемый поток данных в ГИС - проекты, в том числе в режиме реального времени и осуществлять экспорт результатов измерений в виде файлов для обработки в сторонних программах.

Пространственная привязка сети к цифровой модели местности, географическим и другим картам позволяет получить зависимости наблюдаемой обстановки от различных природных и антропогенных параметров и осуществлять прогнозное моделирование возможных лесных пожаров.

Результаты отображаемые на карте в виде интерактивной графики и описательной информации необходимы специалистам для оценки обстановки в on – line режиме и лицам принимающим решение по управлению лесным хозяйством.

Такой подход предлагается реализовать с помощью Web – приложения с MapServer поддержкой [259].

Интерфейс web-приложения включает в себя элементы, которые позволяют пользователю взаимодействовать с сервером, управлять приложением, визуализировать данные и проводить их анализ.

Главная страница управления центром на базе приложения в браузере представлена на (рис. 112).

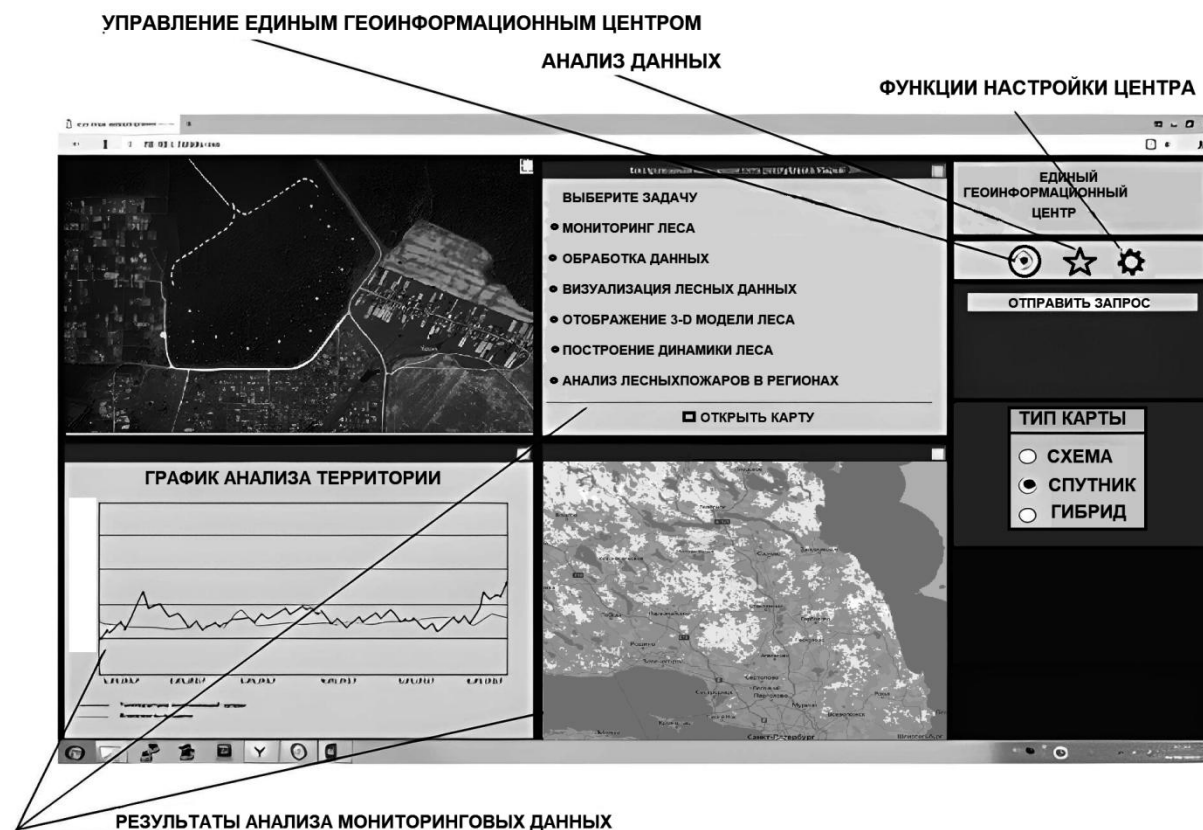


Рис. 112. Главная страница приложения

В четырех окнах слева отображается конфигурация беспроводной сенсорной сети на карте лесной территории, данные характеризующие работу ее узлов, мониторинговая информация и результаты ее анализа. В правой части находится панель управления, на которой располагаются меню приложения, форма оповещения аварийных состояний узлов и критичных мониторинговых данных и чат сотрудников, позволяющий работникам поддерживать связь с оператором.

Такое визуальное представление данных на карте, позволяет заинтересованным пользователям видеть всю картину происходящего на местности (рис. 113).



Рис. 113. Окно визуализации данных на карте

Такой вид серверной конфигурации используется и так называемым «картографическим сервером», который обслуживает запросы пользователя на ту или иную карту. Программы, которые обслуживают запросы клиента, могут быть написаны на различных языках программирования и с помощью различных инструментальных сред, включая PHP, Perl, VisualBasic, C ++, Delphi. Для того, чтобы Web-сервер мог взаимодействовать с ГИС - приложениями, используются различные интерфейсные стандарты, такие как CGI (Common Gateway Interface), Java, ISAPI (Internet Server Application Programming Interface) или NSAPI (Netscape Server Application Programming Interface).

Web-ГИС сервер реализованный по данной стратегии при достаточной производительности позволяет получать доступ к большим и комплексным базам геоданных, которые трудно передать в сети Интернет и обрабатывать на месте из-за их существенных объемов и вести их обработку. При этом число пользователей осуществляющих реализацию геоинформационных функций WebGIS-сервера одновременно может составлять нескольких тысяч.

Важнейшим аспектом в рассматриваемом центре является применение в функционале управления так называемых цифровых двойников и технологий виртуальной (VR) и дополнительной (AR) реальности. Применение данных технологий в сфере лесного значительно расширяет возможности анализа пространственных данных о лесе, динамически меняющихся со временем.

Цифровой двойник как виртуальное представление системы мониторинга лесной территории на цифровой модели лесного участка, можно использовать для визуализации, прогнозирования и предоставления ответов об измеряемых параметрах и функциональных характеристиках системы, прогнозировать результаты мониторинга и выполнять итерации моделируемого процесса, причем с высокой точностью. Геоинформационная модель лесной экосистемы является цифровым двойником, однако некоторые объекты инфраструктуры лесного хозяйства могут быть вне конкретных участков леса, что предопределяет использование геоинформационных моделей территорий.

Симуляция алгоритмов функционирования системы на виртуальных моделях, с целью накопления статистики возможного развития событий для дальнейшего использования при принятии решений в реальных условиях [260].

Цифровые двойники позволяют выбрать нужные режимы работы, провести виртуальные эксперименты, которые в реальных условиях могут быть сопряжены с риском повредить аппаратно-программные компоненты системы. Виртуальные точные копии любых объектов обеспечивают взаимодействие пользователя с системой мониторинга лесных территорий, за счет реализации компьютерной модели, объединяющей информацию в единую среду, которая может меняться во времени. Например, двойники дают возможность проверить влияние различных негативных воздействий на объект при помощи симуляции.

Дополненная реальность обеспечивает встраивание отдельных цифровых компонент в реально существующую систему, что позволяет проведение проверки нововведений и выявить возможные проблемы на различных этапах эксплуатации.

При мониторинге лесных территорий масштабных размеров собираются огромные объемы разнородной информации, которую нужно структурировать и анализировать. На цифровой модели лесной территории используя технологии искусственного интеллекта и Big Data можно быстро искать нужную информацию в большом объеме данных и анализировать их. Цифровой двойник местности позволит без полевых испытаний прогнозировать изменение состояния окружающей среды, исходя из прошлых данных, выявить закономерности погодных или климатических условий на мониторинговой территории для оценки возможного возникновения или определения негативных явлений. В работе [261] впервые предложена последовательная технология геоинформационного моделирования лесной экосистемы, в которой раскрываются особенности и признаки моделирования лесных экосистем с территориального принципа размещения древесной растительности.

Интеграция данных в состав функционального приложения с искусственным интеллектом позволит обеспечить поиск нужной информации в большом объеме мониторинговых данных, используя их для прогнозирования негативных воздействий, исходя из ранее полученных данных.

Современный подход в этом направлении начинается с создания новой технологии, которая интересна и полезна большому числу участников, информационных сервисов и бизнес-процессов. Затем в неё встраиваются инновации и когда продукт готов, вокруг него создается полноценная экосистема из разработчиков, заинтересованных бизнесменов и партнёров.

Средства аналитики, получая определенного вида «телеметрию» от инфраструктуры и приложений, должны быть способны в режиме реального времени осуществлять различные виды анализа о состоянии, поведении и тенденциях как самих ИТ-услуг, предоставляемых ЕГИЦ, так и клиентов, потребляющих эти услуги, а также оценивать, насколько результат соответствует ожидаемому качеству предоставления сервиса.

Как показано в работе [262] слияние трехмерного моделирования с VR и AR обеспечивает пользователям принимать решения, по поведению объекта, хотя и смоделированного.

Виртуальная реальность как компьютерное отображение реального мира позволяет совместить, например, 3D-модель лесной территории, использующей географические данные, и еще не существующую модель систему мониторинга. Модель ее размещения может быть встроена в существующую трехмерную сцену лесной территории с дальнейшим исследованием ее параметров, таких как: связность узлов и топология сети с учетом рельефа местности, таблицы маршрутизации, время и надежность доставки сообщений и т.п.

Моделирование процессов и своевременного мониторинга природно-технических систем является следующим этапом в развитии пространственного анализа территорий, для их рационального использования, что отмечено в работах учёных[263,264]

Использование этих моделей, наряду с AR и VR, открывает инновационные возможности для получения опыта взаимодействия пользователя с сервисами ЕГИЦ в режиме реального времени и это не просто некое нереальное видение, а технология принятия решения на основе цифровой модели среды и происходящих событий. Так, например, можно реализовать ситуацию по определению рисков распространения лесных пожаров на основе модели высот ветвей и крон (выявляются участки, где низовой пожар может переходить в верховой), риски перехода пожара на населенные пункты, вероятные направления распространения пожара и т.п.

Графическая система таких технологий позволяет отображать на мониторе во всех плоскостях объекты и их динамику, а также данные, которые к ним относятся (описание, характеристики, результаты расчетов и т.д.). В такой системе отсутствуют ограничения по масштабированию отображения 3D модели, и если это один «движок», то переход от одного масштаба 3D модели к

другому будет бесшовным. Все остальное – это интерфейс и алгоритмы работы с объектами 3D модели, которые будут наполнять базу данных.

Для пользователя будет меняться только интерфейс при редактировании объектов – в зависимости от ситуации и состояния самого объекта. Такая платформа позволяет разрабатывать любые модели объектов без ограничений по размерам и сложности, а значит, не будет технологической проблемы проектировать новый объект, рассчитать его статические и динамические характеристики, проводить испытания – все в одной графической среде с использованием единой базы данных. Нет необходимости переносить данные, конвертировать и использовать разное ПО.

5.3. Геоинформационная модель лесной экосистемы как компонент системы управления в едином геоинформационном центре

Создание геоинформационной модели леса в едином геоинформационном центре осуществляется путем сопоставления цифровой модели рельефа и цифровой модели местности, определяемых по данным дистанционного зондирования Земли, после их согласования и приведения к единому пространственному разрешению.

Лесной массив представляется не в виде отдельных деревьев, а как непрерывная трехмерная структура, наслаивающаяся на рельеф местности, которой могут отображаться квартальная и дорожная сеть, водоохранные зоны вдоль рек, склоны и их крутизна и многое другое. Основная задача визуализации данных в таком способе исполнения это управление и непрерывный мониторинг ведения лесного хозяйства и лесопользования на землях лесного фонда.

Реализация такой комплексной ИГИС позволит также решить задачу прогнозных расчётов на базе обрабатываемой информации. Устаревание информации в лесном хозяйстве сказывается на качестве управления лесными ресурсами при назначении хозяйственных мероприятий и контроле управления.

Процедурная форма представления знаний в ИГИС на базе организации машинного обучения и биологической структуры леса позволит делать точные прогнозы процессов роста, развития и количественной оценки лесов.

Решение основных задач, стоящих перед лесной отраслью, базируется, на основополагающих принципах качественного и количественного учета леса.

Интеграция данных в состав ЕГИЦ реализуема через построение трёхмерной модели лесной экосистемы выбранного участка, где каждой модели присваиваются определённые свойства, отражающие характеристики процессов реального мира, что делает модель лесного участка приближенной по своим свойствам к физическому объекту, что позволяет получить комплексность сведений о лесной экосистеме. Технологическое обеспечение построения точных цифровых моделей, описывается в работе авторов [265,266] где предлагаются методики на основе графических движков и технологии геопространственного проектирования лесов. Однако, реализация технологии построения и отображения данных о лесном фонде, это одна из технологических задач лесной отрасли и геоинформатики. Вторая важная задача — это создание единого геоинформационного комплекса, в котором отображение, координирование и анализ сведений являлось удобной для специалистов лесного хозяйства, с учётом специфики ведения лесного хозяйства и формирования лесоустроительной информации. Необходимо отметить, что технологическая база для внедрения передовых технологий в отрасль лесного хозяйства, как дополненная реальность, сформирована в полном объёме и успешно применяется в смежных отраслях.

Дополненная реальность как связующее звено между виртуальной реальностью и действительностью отличается тем, что она включает размещение изображения некоего объекта на картине реального мира. Примером могут служить ситуации, при которых создаётся образ лесного участка, охваченного пожаром, а на него накладывается схематическое изображение выполняемых мер по его тушению и последовательность противопожарных действий.

Взаимодействие лица принимающего решения (рис. 114) происходит посредством анализа и решения задач геоинформационного моделирования на основе интеграции данных различных форматов в ходе взаимодействия процессов моделирования и проектирования лесных территорий в ЕГИЦ. Современные геоинформационные системы используемые в лесном хозяйстве [267] решают только часть обозначенных задач, поскольку в своей структуре используют преимущественно растровые типы данных, слои данных в них представлены в виде набора полигонов, выделов и линий векторного формата, однако это не единственные из возможных способов представления многоуровневой информации о состоянии земель лесного фонда.

На сегодняшний день объективно требуется переход к интерактивным трёхмерным картам, способным наиболее объективно и комплексно предоставить информацию о состоянии объекта. Одной из деятельности ЕГИЦ предполагается использование полученных геопространственных данных в качестве моделирования и формирования различных сценариев развития природных ресурсов в их долгосрочной динамике. К таким видам деятельности можно отнести геоинформационное моделирование лесных экосистем определённой территории, требующей, к примеру, лесовосстановления, связанное с потерей лесного покрова в связи с лесными пожарами, истощительным лесопользованием или лесопатологическими процессами. В 2022 по данным рослехоза было восстановлено более 1 млн гектар лесного фонда что в целом отражает стабильные показатели лесовосстановления за последние 10 лет. Однако важно отметить, что сам процесс лесовосстановления не ограничивается только посадкой лесных культур, качественный уход, анализ состояния насаждений в последующие годы взращивания залог успешного возобновления лесных ресурсов. Поэтому геоинформационный анализ и геоинформационное моделирование перечисленных процессов имеют важное значение в практическом и экономическом плане, так как на закупку посадочного материала используются бюджетные средства, важно, что бы

лесовосстановление было успешно не только по климатическим причинам, но и по экономическим [318].

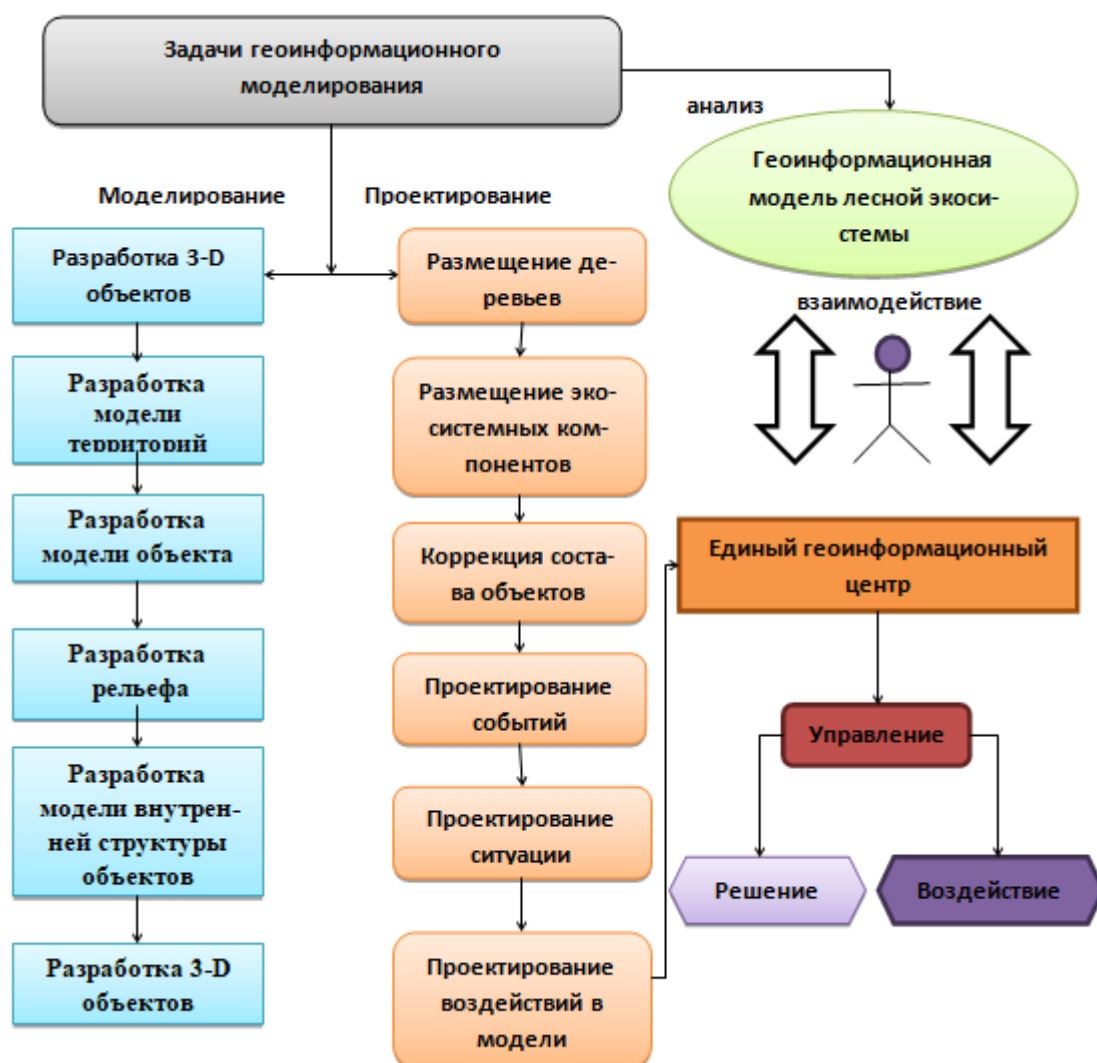


Рис. 114. Схема взаимодействия компонент ЕГИЦ в ходе геоинформационного моделирования.

Эффективное взаимодействие в такой конфигурации предполагает объединение всех источников информации в единую информационно-коммуникационную среду, с учетом разнообразия и разнородности ее компонентов.

В таких средах системоформирование смещается от локальных, разрозненных и слабосвязных компьютерных/сетевых архитектур к глобально распределенным и сильно связным на основе сетецентрического подхода

построения структуры ЕГИЦ определяющего формирования единого связанного цикла технологических задач управления лесным хозяйством на основе:

- системного мониторинга лесных экосистем;
- мониторинга лесовосстановления;
- лесопатологический мониторинг;
- сбора таксационных данных;
- мониторинга пожарной обстановки.

Большое количество достаточно разнообразных задач управления лесным хозяйством предполагает необходимость сильно связанной, единой системы, в которой лицо принимающее решение может комплексно оценить текущую обстановку с разных позиций и выработать управляющее воздействие учитывающее наиболее обобщённый набор рассматриваемых данных и ситуаций.

Связность таких систем определяется универсальными компьютерно-сетевыми технологиями, системообразующие свойства которых инвариантны к количеству и составу связываемых устройств путем перехода от классических архитектур информационных систем и технологий к сетецентрическим моделям.

Лесохозяйственные задачи, требующие единой среды взаимодействия гетерогенных данных с пользователями, включают в себя: картографию, охрану природы, составление кадастров, инвентаризацию лесов, контроль хода производственных процессов в лесном хозяйстве, прогноз возможных пожаров, выявление заболеваний и распространение насекомых-вредителей на лесных территориях.

Особенно важным на сегодняшний день является комплексное представление информации в разном возможном способе её отображения. Леса занимают обширные территории, зачастую являющиеся компонентами многих других составных систем. Более того, лес является средой обитания для других представителей фауны, здесь задача отображения картографической информации сопряжена с необходимостью отображения информации

ситуационной, т.е. информации, меняющейся с течением времени. Поэтому статичные карты показывающие ситуацию в момент её разработки требуют визуального дополнения, сценарного развития и прогнозирования, что становится возможным благодаря расширению опциональных интерфейсов и функций визуализации данных на карте, на основе технологий интеллектуального анализа данных и графического моделирования. Фактически данный процесс отображения и моделирования информации на определённой территории можно обозначить как процесс геоинформационного моделирования территорий. Согласно научной работе [268] моделирование независимых объектов продиктовано потребностью отображения их содержания, взаиморасположения и формы именно для конкретной местности.

В такой конфигурации для конечных пользователей реализуется наиболее удобная форма организации работы с информационными ресурсами, при которой существует возможность не задаваться вопросом о том, где и в какой форме хранятся и циркулируют данные, с которыми он работает.

На основе предложенной архитектуры ЕГИЦ обеспечивается: многоканальный сбор, первичная обработка и накопление разноплановой фрагментарной информации, поступающей с различных компонентов единой информационно-коммуникационной среды, отражающих состояние этой среды и их текущее внутреннее состояние; формирование посредством распределенной компьютерной переработки собираемой и накапливаемой информации целостной картины из информационных фрагментов, которая определяет текущее состояние системы целом и её частей и является основой для выработки управляющих воздействий. Так, в работах [269,270] особенности территориального управления направлены как на улучшение технологий управления территории, так и на выработку наиболее лучших принципов развития социально-экономического развития регионов, особенно тех, в которых преобладают лесные ресурсы. Включая возможности использования технологий гипермедиа – 3-D моделирования, VR/AR технологий при задачах

пространственного анализа территорий и геообъектов. [271,272]. Можно отметить, что фундаментальной задачей применения Единого геоинформационного центра является эффективное управление территорией покрытых лесом, что может быть использовано как государственными учреждениями, так и компаниями арендаторами земель лесного фонда в задачах стратегического планирования и целевого развития [323].

По результатам исследования данной части диссертационной работы разработана аппаратно-программная реализация архитектура информационной системы единого геоинформационного центра лесного хозяйства. Подход управления землями лесного фонда на основе предлагаемой концепции единого геоинформационного центра и архитектуры информационной системы основан на четырёх компонентах анализа текущей ситуации государственного управления лесами:

- отсутствием большого количества штата лесных инспекторов;
- огромной площадью земель лесного фонда, требующей периодического мониторинга территории;
- возможностью современных программно-аппаратных средств представлять, обрабатывать и визуализировать геопространственную информацию в удобном для восприятия виде.
- необходимостью развития и внедрения передовых методов в рамках адаптации цифровых технологий для социально-экономического развития территорий.

Применение представленной аппаратно-программной инфраструктуры единого геоинформационного центра обеспечивает интеграцию всех компонент и источников данных, различной структуры, в единую сетевую среду обеспечивающую оперативное решение лесохозяйственных задач в новых условиях развития экономики и цифровой трансформации лесного комплекса.

5.4. Рекомендации по развитию технологии управления лесными экосистемами на основе геоинформационного моделирования

В качестве основных рекомендаций для обеспечения применимости результатов геоинформационного моделирования возможны следующие рекомендации:

1. Необходимо внедрить предлагаемые методологические решения на базе деятельности одного из лесничеств, для получения общих отзывов по работе с геоинформационными моделями лесных экосистем, как модельный пилотный проект.

2. Необходимо создание единого универсального и унификационного формата обмена трёхмерными моделями деревьев, в качестве такого формата может быть предложен формат .drev. Такой унифицированный подход позволит стандартизировать формируемые различными пользователями единые каталоги трёхмерных моделей деревьев.

3. Необходимо создание единого каталога трёхмерных моделей лесообразующих пород России как элемента цифрового киберпространства для работы с геоинформационными моделями в интересах развития лесного хозяйства России и учёта количественного и качественного состава лесов.

4. Использование моделей связано с возможностью контроля соответствия фактического состояния древесной растительности с его цифровым представлением в моделируемой среде. Данная функция в составе геоинформационной модели позволяет сделать важную практическую составляющую: не просто сформировать абстрактное представление количества лесных ресурсов на картографических материалах, а сформировать такое представление данных, при котором станет невозможным процесс его искажения, поскольку в данном случае процесс отображения материалов связан с их визуальным представлением в реальном мире и привязан к географическим

координатам, а также связан с геопространственной информацией - таксационными данными, которые могут быть привязаны к каждому дереву.

5. В качестве чёткой фиксации данных возможно наделить разработанную геоинформационную модель свойством, при котором будет произведена фиксация с его натурным состоянием. Для этого, возможно использование API ключа карт, где соответствие модели будет выражено через соответствие данных, полученных со спутникового изображения. Второй вариант возможен посредством интеграции модели с технологией блокчейн

6. С 1 января 2023 года должна заработать федеральная информационная система лесного комплекса. Она призвана обеспечить создание единого цифрового пространства для хранения сведений о лесах, а также для учёта древесины и сделок с ней. Конечно, основное представление такой информации – это достоверные количественные и качественные показатели древесной растительности, однако необходим ещё один инструмент, позволяющий исключить любые сторонние манипуляции, искажающие цифровую информацию и оценки лесных ресурсов. В качестве такого инструмента может выступить технология геоинформационного моделирования леса, интегрированная в состав федеральной информационной системы, фактически являющаяся точной копией лесного участка на основе данных дистанционного зондирования Земли, таксационных данных и трёхмерного отображения лесообразующих пород в программной среде.

7. В качестве альтернативы современной государственной инвентаризации лесов возможна реализация государственной цифровой копии лесных ресурсов, которая станет базовым элементом представления сведений о лесных ресурсах на основе геоинформационного моделирования лесных экосистем.

8. Необходима срочная комплексная информатизация лесного хозяйства на базе современных передовых технологий, в качестве альтернативного метода управления лесными ресурсами возможно централизованное обеспечение геопространственной информацией о состоянии лесных ресурсов на базе

технологий геоинформационного моделирования и предлагаемых геоинформационных моделей лесных экосистем, особенно в труднодоступных и малоосвоенных регионах.

5.5. Выводы по Главе 5

В 5 Главе диссертационной работы раскрываются методы управления геоинформационными моделями лесных экосистем на базе предлагаемого единого геоинформационного центра. Геопространственное развитие России зависит от многих факторов, к некоторым из них можно отнести фактор развития целевого использования и возобновления лесных экосистем. Лесопользование есть и является одним из видов хозяйственной деятельности человека в ближайшем будущем, однако рациональное использование данного ресурса играет особую и важную роль в биосистемном и экологическом плане. Реализация единого геоинформационного центра позволит обеспечить централизованное агрегирование геопространственной информации, проводить её анализ и геоинформационное моделирование, распределять полученную информацию для необходимости различным ведомствам, чьи решения обеспечивают региональное развитие на основе целевого использования природных ресурсов. В 5 Главе, описаны структура единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством, инфраструктура единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством, указывается о возможности применения геоинформационного моделирования лесных экосистем, как элемента управления в едином геоинформационном центре, а также сформированы научно-практические рекомендации по развитию технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования изучены и проанализированы современные технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем. Изучен мировой опыт научных исследований в области применения геоинформационных технологий в лесном хозяйстве. Предложена новая парадигма управления лесными ресурсами на базе технологий геоинформационного моделирования. Сформированы концептуальные решения по проблематике технологии геоинформационного моделирования и обозначена научная проблема.

В рамках реализации технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем описаны концептуальные основы геоинформационного моделирования лесных экосистем. Сформированы признаки характеризующие процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем, разработаны новые термины и определения представляющий собой научно-методологический аппарат в данном научном направлении. Разработан метод интерактивного геомоделирования лесных экосистем, составлена инфологическая модель компонентов геоинформационного моделирования лесных экосистем. Предложена классификация геоинформационных моделей лесных экосистем исходя из масштаба формирования и проектирования модели леса и целевого назначения модели. Для подготовки к процессу реализации технологии геоинформационного моделирования разработаны трёхмерные каталоги 3-d моделей лиственных и хвойных лесообразующих пород деревьев Северо-Запада России и получены свидетельства о регистрации баз данных трёхмерных моделей.

На основании доступного геоинформационного и технологического обеспечения проведена разработка каждого из предложенных в работе типа геоинформационных моделей лесных экосистем: дистанционной, макромоделей, микромоделей лесной экосистемы. Отдельным этапом разработаны

низкополигональные 3-d модели деревьев. Проведены полевые исследования для сбора геопространственной и таксационной информации об объекте исследования - 196 квартале Лисинского учебно-опытного лесничества. На основании собранных данных и дополнительных открытых источников разработаны полноценные трёхмерные геоинформационные модели лесных экосистем включающие в себя рельеф, данные дистанционного зондирования, трёхмерные данные и атрибутивную информацию о объектах моделирования. При помощи высокопроизводительного серверного оборудования аналогичным образом реализованы остальные типы геоинформационных моделей, макромоделей лесной экосистемы и микромодель лесной экосистемы. Описаны возможности их применения в смежных научных областях.

Для обеспечения процесса геоинформационного моделирования наиболее комплексными инструментами анализа покрытой лесом земли лицу принимающему решения многомерными данными, отдельно описаны дополнительные компоненты интеллектуального анализа данных. Для этого в диссертационной работе предложено использование инструмента прототипа разработанной интеллектуальной геоинформационной системы сочетающей в себе технологии визуализации трёхмерных моделей и библиотек машинного обучения. Отдельным этапом разработана система верификации геоинформационных моделей лесных экосистем на базе дистанционных материалов учебно-опытного лесничества, филиала СПбГЛТУ.

В итоговой части работы сформированы концептуальные решения по предлагаемой структуре единого геоинформационного центра, в котором основным элементом управления лесными землями выступают предложенные геоинформационные модели лесных экосистем как геопространственный цифровой двойник территории. Даны научно-практические рекомендации по развитию технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ

1. Бескид П.П. Геоинформационные системы и технологии / Бескид П.П., Куракина Н.И., Орлова Н.В.. — Санкт-Петербург : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2010. — 173 с. — ISBN 978-5-86813-267-4. Текст: электронный // IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/17902.html> (дата обращения: 06.07.2022).
2. Бескид П. П., Байков Е. А., Истомин Е. П. Геоинформационное управление как современный подход к управлению пространственно-распределенными системами и территориями // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2015. – № 41. – С. 220-239.
3. Бескид П. П. Геоинформационная система поддержки принятия решений при ликвидации нефтяных разливов на поверхности акватории / П. П. Бескид, В. А. Миранков // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2013. – № 30. – С. 199-203.
4. Е. П. Истомин, С. Ю. Степанов, О. Н. Колбина [и др.] Геоинформационная система управления пространственно - распределенными разнородными гидрометеорологическими данными для принятия управленческих решений по оптимизации регулирования отпуска тепла на ТЭЦ // Естественные и технические науки. – 2019. – № 4(130). – С. 134-136.
5. Истомин Е. П. Современные подходы к разработке ГИС / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. Е. Истомин // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2019. – № 2(34). – С. 166-169.
6. Е. П. Истомин, С. Ю. Степанов, Я. А. Петров, А. Ю. Сидоренко Концептуальная модель обработки данных дистанционного зондирования Земли в интересах управления территориями // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2020. – № 1(37). – С. 195-205.

- 7.Карпик А. П. Совершенствование методики контроля качества спутникового позиционирования при создании геоинформационного пространства территориального образования / А. П. Карпик, Е. И. Аврунев, А. А. Варламов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № S4. – С. 182-186.
- 8.Майоров А. А. О проблеме построения распределенных децентрализованных обобщенных геоинформационных технологий реального времени / А. А. Майоров, А. В. Матерухин, О. Г. Гвоздев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – № 3. – С. 341-348. – DOI 10.30533/0536-101X-2020-64-3-341-348.
- 9.Майоров А. А. Структура системы обработки потоковых данных в геосенсорных сетях / А. А. Майоров, А. В. Матерухин, И. Н. Кондауров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – Т. 62. – № 6. – С. 712-719. – DOI 10.30533/0536-101X-2018-62-6-712-719.
- 10.Присяжнюк С. П. Предоставление доступа к распределенным базам данных на основе внедрения агентов сбора информации / С. П. Присяжнюк, М. С. Назаров // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. – 2020. – № 29. – С. 96.
- 11.Зализнюк А. Н. Геоинформационные объектно-ориентированные модели формирования образного мышления / А. Н. Зализнюк, Д. Е. Гоманов, С. П. Присяжнюк // Информация и космос. – 2018. – № 4. – С. 129-134.
- 12.С. П. Присяжнюк, А. С. Присяжнюк, А. А. Чернов, А. А. Петров Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617369 Российская Федерация. Программное обеспечение "Клиент системы визуализации виртуального полигона" : № 2021616516 : заявл. 30.04.2021 : опубл. 13.05.2021 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы

Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

13.Е. П. Истомин, И. С. Храмов, А. Г. Соколов, Н. В. Яготинцева Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620027 Российская Федерация. База данных оценочных параметров в ближней морской зоне северных морей : № 2020622792 : заявл. 22.12.2020 : опубл. 12.01.2021 /; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

14.А. П. Карпик, Г. Н. Ткачева, Э. Л. Ким Патент № 2680978 С1 Российская Федерация, МПК G06T 17/05. Способ геодезического мониторинга деформационного состояния земной поверхности в сейсмоопасных районах с применением технологии лазерного сканирования : № 2018104652 : заявл. 06.02.2018 : опубл. 01.03.2019 ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет геосистем и технологий".

15.Алексеев А. С. Мониторинг лесопользования с применением открытых материалов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) / А. С. Алексеев, А. А. Филатов // Цифровые технологии в лесном секторе : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 26–27 марта 2020 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 5-8.

16.А. С. Алексеев, А. А. Михайлова, Д. М. Черниковский, В. И. Березин Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2017. – № 2. – С. 67-77.

17. А. Ж. Сатаев, А. С. Алексеев Современные геоинформационные технологии (ГИТ) и возможности их применения в лесном хозяйстве и лесоустройстве /// Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 26–28 мая 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 133-136.
18. И. А. Сайгин, Ф. В. Стыценко, С. А. Барталев Создание временной серии карт растительности на основе динамической актуализации обучающей выборки // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 15–19 ноября 2021 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2021. – С. 378.
19. Т. С. Ховратович, С. А. Барталев Методы дистанционной оценки показателей горизонтальной структуры древесного полога по данным спутниковой системы Modis // Фундаментальные и прикладные космические исследования : Сборник трудов XVII Конференции молодых учёных, Москва, 30 сентября – 02 октября 2020 года / Под редакцией А.М. Садовского. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2020. – С. 149-154. – DOI 10.21046/KMU-2020-149-154.
20. Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев. Дистанционные методы в лесном хозяйстве : учебное пособие / – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 266 с. – ISBN 978-5-8158-2149-1.
21. E. A. Kurbanov, O. N. Vorobev, S. A. Lezhnin [et al.] Forest cover trend analysis using MODIS time series and its climatic responses in the Mari El Republic of Russia // Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring. – 2021. – No 7(7). – P. 29-38.
22. К. Фан Тхань, Д. Буй Динь, А. В. Любимов. Применение географических информационных систем (ГИС) в лесном хозяйстве // Актуальные вопросы в

лесном хозяйстве : Материалы III международной научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 06–08 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Полиграф-Экспресс, 2019. – С. 192-196.

23. В. В. Столярова, А. В. Любимов, М. Г. Будник, Ю. А. Галанина. Использование вегетационных индексов для оценки состояния растительности по материалам дистанционного зондирования // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы IV научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 22–25 мая 2019 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2019. – С. 61-63.

24. Т. К. Фан, Ч. Т. Нгуен, А. С. Алексеев. Применение дистанционных методов и ГИС-технологий для классификации земель Пушкинского района Санкт-Петербурга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. – № 235. – С. 84-102. – DOI 10.21266/2079-4304.2021.235.84-102.

25. Черниховский Д. М. Использование автоматической классификации рельефа Ивахаши и Пайка для оценки количественных и качественных характеристик лесов на основе моделей высот рельефа и поверхности / Д. М. Черниховский // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2018. – № 223. – С. 100-126. – DOI 10.21266/2079-4304.2018.223.100-126.

26. Официальный сайт: Портал ГИС-лаб. <https://gis-lab.info/>

27. S. Li et al., "Forest Stand Height Estimation Using Ziyuan-3 Tri-Stereo Imagery and Lidar," IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2019, pp. 6681-6684, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8897913.

28. В. Ф. Ковязин, К. П. Виноградов, Е. А. Васильева, А. А. Киценко. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 6(378). – С. 42-54. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54.

29. Рыльский, И. А. Подходы к определению таксационных показателей леса с использованием аэрокосмических снимков и лазерного сканирования / И. А. Рыльский // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2018. – Т. 24. – № 2. – С. 216-240. – DOI 10.24057/2414-9179-2018-2-24-216-240.
30. А. П. Жернова, М. Р. Вагизов. Особенности технологии лазерного сканирования при выполнении лесотаксационных работ // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы третьей международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 года / Под редакцией В.М. Гедьо. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2018. – С. 77-80.
31. М. Р. Вагизов, А.М. Заяц. Современные проблемы цифровизации лесного хозяйства. Информационные системы и технологии: теория и практика: сб. научн. тр. Вып. 14 / отв. ред. М. Р. Вагизов. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2022. – 252 с.
32. Зорина Ю. О. Анализ методов применения машинного обучения в сельскохозяйственной отрасли / Ю. О. Зорина // Студенческий. – 2022. – № 18-4(188). – С. 41-43.
33. Абрамян С. С. Машинное обучение в сельском хозяйстве / С. С. Абрамян // Исследование путей развития научно-технического потенциала общества в стратегическом периоде : сборник статей Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 07 апреля 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2021. – С. 22-25.
34. Васютенко Д. М. Развитие инновационных систем в картографии / Д. М. Васютенко, А. С. Кривогузова // Инновации. Наука. Образование. – 2022. – № 51. – С. 789-797.
35. Мельниченко И.А. Трехмерное гео моделирование границ литологических разностей железорудных месторождений на основе пространственно-координированных данных : специальность 25.00.35 "Геоинформатика" :

автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мельниченко Алья Ашотович. – Москва, 2022. – 30 с.

36.Молокина Т. С. Анализ состояния и перспективы развития визуализации пространственных данных / Т. С. Молокина, А. А. Колесников // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 4. – С. 73-82. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-4-73-82.

37.Писарев В. С. Автоматизированное обновление цифровых моделей геопространства / В. С. Писарев, Б. Н. Ахмедов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 46-50.

38.П. А. Анашкин Цифровые информационные модели как инструмент исследования геопространства / Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27. – № 3. – С. 19-29. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-19-29

39.Левшун Д.С., Чечулин А.А., Котенко И.В. Комплексная модель защищенных киберфизических систем для их проектирования и верификации // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 114–123. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-114-123

40.Гребенюк А. Л. Обоснование векторно-растровой модели ГИС в целях разработки критериев для устойчивого лесопользования / А. Л. Гребенюк // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. – 2012. – Т. 1. – С. 77-81.

41.Громов И. А. Особенности создания цифровой модели местности для проектирования транспортной сети многоцелевого лесопользования / И. А. Громов, Н. А. Тюрин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2017. – № 219. – С. 133-143. – DOI 10.21266/2079-4304.2017.219.133-143.

42.Abedi Gheshlaghi H. Using GIS to develop a model for forest fire risk mapping // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2019. – Т. 47. – №. 7. – С. 1173-1185.

43. Akumu C. E., Baldwin K., Dennis S. GIS-based modeling of forest soil moisture regime classes: Using Rinker Lake in northwestern Ontario, Canada as a case study // *Geoderma*. – 2019. – Т. 351. – С. 25-35.
44. Е. А. Гаврилюк, Н. В. Королева, Д. А. Карпухина [и др.] Геопространственное моделирование биометрических и структурных характеристик лесов Брянской области на основе спутниковых и выборочных лесотаксационных данных // *Лесоведение*. – 2021. – № 6. – С. 609-626. – DOI 10.31857/S002411482106005X.
45. Черкашин А. К. Геоинформационное моделирование и картографирование углеродного запаса бореальных лесов Прибайкалья / А. К. Черкашин, С. В. Солодянкина // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. – 2010. – Т. 16. – С. 388-395.
46. Мясникова С. И. Прогнозное геоинформационное моделирование и картографирование динамики запасов таежных лесов / С. И. Мясникова, А. К. Черкашин // *Геодезия и картография*. – 2010. – № 11. – С. 30-33.
47. Wallace L. et al. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory // *Remote sensing*. – 2012. – Т. 4. – №. 6. – С. 1519-1543.
48. Bouvier M. et al. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data // *Remote Sensing of Environment*. – 2015. – Т. 156. – С. 322-334.
49. Rishmawi K.; Huang, C.; Zhan, X. Monitoring Key Forest Structure Attributes across the Conterminous United States by Integrating GEDI LiDAR Measurements and VIIRS Data. *Remote Sens.* 2021, 13, 442. <https://doi.org/10.3390/rs13030442>
50. Пьянков С. В. Инвентаризация лесов с использованием технологии воздушно-лазерного сканирования: сравнение экспериментальных результатов в РФ и Финляндии / С. В. Пьянков, А. В. Кедров, А. В. Тарасов // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 13–17 ноября 2017 года / Институт космических исследований Российской академии

наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2017. – С. 387.

51. Кедров А. В. Методические особенности таксации леса с использованием данных воздушного лазерного сканирования / А. В. Кедров, И. В. Вербейко, С. А. Демиденко // Цифровые технологии в лесном секторе : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 26–27 марта 2020 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 67-70.

52. В. Ф. Ковязин, К. П. Виноградов, Е. А. Васильева, А. А. Киценко Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 6(378). – С. 42-54. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54.

53. Бойко Е. С. Цифровое моделирование древесно-кустарниковой растительности аккумулятивных берегов по данным воздушного лазерного сканирования / Е. С. Бойко, А. В. Карагян // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 103-114. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-103-114.

54. Данилин И. М., Фаворская М. Н. Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации // Лесная таксация и лесоустройство. – 2011. – №. 1-2. – С. 40-47.

55. Копанева И. М. Картографирование проблем лесного хозяйства на основе данных дистанционного зондирования Земли / И. М. Копанева, Е. О. Малоухова, Е. А. Рублева // Проблемы региональной экологии и географии : Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию конструктора М.Т. Калашникова и 100-летию профессора С.И. Широбокова, Ижевск, 07–10 октября 2019 года. – Ижевск: Издательский центр "Удмуртский университет", 2019. – С. 253-256.

56. Лебзак Е. В. Разработка методики геоинформационного картографирования лесного хозяйства с применением мобильных технологий / Е. В. Лебзак, С. С. Янкелевич // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27. – № 1. – С. 86-96. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-1-86-96.
57. Вагизов М. Р., А.А. Гаврилюк. Управление лесными землями на основе геоинформационных моделей лесных экосистем // Информационные системы и технологии: теория и практика : сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 24 февраля 2022 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. 2022. – С. 94-100.
58. White J. C., Wulder, M. A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Cook, B. D., ... & Woods, M. (2013). A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. *The Forestry Chronicle*, 89(6), 722-723.
59. Queinnec M. et al. Developing a forest inventory approach using airborne single photon lidar data: from ground plot selection to forest attribute prediction // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. – 2022. – Т. 95. – №. 3. – С. 347-362.
60. Brice Mora, Michael A. Wulder, Geordie W. Hobart, Joanne C. White, Christopher W. Bater, Francois A. Gougeon, Andrés Varhola & Nicholas C. Coops. Forest inventory stand height estimates from very high spatial resolution satellite imagery calibrated with lidar plots. *International Journal of Remote Sensing* Volume 34, 2013 - Issue 12. Pages 4406-4424 doi.org/10.1080/01431161.2013.779041
61. Beaudoin A., Hall, R. J., Castilla, G., Filiatrault, M., Villemaire, P., Skakun, R., & Guindon, L. (2022). Improved k-NN mapping of forest attributes in northern Canada using spaceborne L-band SAR, multispectral and LiDAR data. *Remote Sensing*, 14(5), 1181.
62. White J. C. et al. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach // *The Forestry Chronicle*. – 2013. – Т. 89. – №. 6. – С. 722-723.

63. White J. C. et al. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review // *Canadian Journal of Remote Sensing*. – 2016. – T. 42. – №. 5. – C. 619-641.
64. Treitz P., Lim, K., Woods, M., Pitt, D., Nesbitt, D., & Etheridge, D. (2012). LiDAR sampling density for forest resource inventories in Ontario, Canada. *Remote Sensing*, 4(4), 830-848.
65. Castilla G.; Hall, R.J.; Skakun, R.; Filiatrault, M.; Beaudoin, A.; Gartrell, M.; Smith, L.; Groenewegen, K.; Hopkinson, C.; van der Sluijs, J. The Multisource Vegetation Inventory (MVI): A Satellite-Based Forest Inventory for the Northwest Territories Taiga Plains. *Remote Sens.* 2022, 14, 1108. <https://doi.org/10.3390/rs14051108>
66. Queinnec, M., Coops, N. C., White, J. C., McCartney, G., & Sinclair, I. (2022). Developing a forest inventory approach using airborne single photon lidar data: from ground plot selection to forest attribute prediction. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 95(3), 347-362.
67. Zhang, J., Huang, S., Hogg, E. H., Lieffers, V., Qin, Y., & He, F. (2014). Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data. *Biogeosciences*, 11(10), 2793-2808.
68. Chen Y., Kershaw, J. A., Hsu, Y. H., & Yang, T. R. (2020). Carbon estimation using sampling to correct LiDAR-assisted enhanced forest inventory estimates. *The Forestry Chronicle*, 96(1), 9-19.
69. Matasci G., Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., Hobart, G. W., ... & Bater, C. W. (2018). Three decades of forest structural dynamics over Canada's forested ecosystems using Landsat time-series and lidar plots. *Remote Sensing of Environment*, 216, 697-714.
70. Bolton D. K., Coops N. C., Wulder M. A. Characterizing residual structure and forest recovery following high-severity fire in the western boreal of Canada using Landsat time-series and airborne lidar data // *Remote Sensing of Environment*. – 2015. – T. 163. – C. 48-60.

- 71.Chen G., Hay G. J., St-Onge B. A GEOBIA framework to estimate forest parameters from lidar transects, Quickbird imagery and machine learning: A case study in Quebec, Canada //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2012. – T. 15. – C. 28-37.
- 72.Mahoney C.; Hall, R.J.; Hopkinson, C.; Filiatrault, M.; Beaudoin, A.; Chen, Q. A Forest Attribute Mapping Framework: A Pilot Study in a Northern Boreal Forest, Northwest Territories, Canada. Remote Sens. 2018, 10, 1338. <https://doi.org/10.3390/rs10091338>
- 73.Holopainen M. et al. Forest inventory attribute estimation using airborne laser scanning, aerial stereoimagery, radargrammetry and interferometry-Finnish experiences of the 3D techniques. – 2015.
- 74.Mäkisara K., Katila, M., Peräsaari, J., & Tomppo, E. The multi-source national forest inventory of Finland—methods and results 2013. – 2016.
- 75.Haakana H. Heikkinen, J., Katila, M., & Kangas, A. Efficiency of post-stratification for a large-scale forest inventory—case Finnish NFI //Annals of Forest Science. – 2019. – T. 76. – №. 1. – C. 1-15.
- 76.White J. C., Tompalski, P., Vastaranta, M. A., Wulder, M. A., Saarinen, N. P., Stepper, C., & Coops, N. C. A model development and application guide for generating an enhanced forest inventory using airborne laser scanning data and an area-based approach. – 2017.
- 77.Niemi M., Vastaranta, M., Peuhkurinen, J., & Holopainen, M. Forest inventory attribute prediction using airborne laser scanning in low-productive forestry-drained boreal peatlands. – 2015.
- 78.Saukkola A., Melkas, T., Riekk, K., Sirparanta, S., Peuhkurinen, J., Holopainen, M., ... & Vastaranta, M. Predicting forest inventory attributes using airborne laser scanning, aerial imagery, and harvester data //Remote Sensing. – 2019. – T. 11. – №. 7. – C. 797.
- 79.Kauranne T.; Pyankov, S.; Junttila, V.; Kedrov, A.; Tarasov, A.; Kuzmin, A.; Peuhkurinen, J.; Villikka, M.; Vartio, V.-M.; Sirparanta, S. Airborne Laser Scanning

Based Forest Inventory: Comparison of Experimental Results for the Perm Region, Russia and Prior Results from Finland. *Forests* 2017, 8, 72.
<https://doi.org/10.3390/f8030072>

80.Neuenschwander N., Hayek U. W., Grêt-Regamey A. Integrating an urban green space typology into procedural 3D visualization for collaborative planning //Computers, Environment and Urban Systems. – 2014. – T. 48. – C. 99-110.

81.Mangiameli M., Mussumeci G., Cappello A. Forest Fire Spreading Using Free and Open-Source GIS Technologies //Geomatics. – 2021. – T. 1. – №. 1. – C. 50-64.

82.Perera K. et al. A Combined Approach of Remote Sensing, GIS, and Social Media to Create and Disseminate Bushfire Warning Contents to Rural Australia //Earth. – 2021. – T. 2. – №. 4. – C. 715-730.

83.Ullah F. et al. Uav based spatiotemporal analysis of the 2019–2020 new south wales bushfires //Sustainability. – 2021. – T. 13. – №. 18. – C. 10207.

84..Munawar H. S. et al. UAV assisted spatiotemporal analysis and management of bushfires: A case study of the 2020 victorian bushfires //Fire. – 2021. – T. 4. – №. 3. – C. 40.

85.McKenna P. et al. Measuring fire severity using UAV imagery in semi-arid central Queensland, Australia //International Journal of Remote Sensing. – 2017. – T. 38. – №. 14. – C. 4244-4264.

86.Battada D. T., Mackenzie P. Applications of Mobile GIS in Forestry South Australia // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2012. – T. 39. – C. B5.

87.Chen Y., Zhu X. An integrated GIS tool for automatic forest inventory estimates of Pinus radiata from LiDAR data // GIScience & remote sensing. – 2013. – T. 50. – №. 6. – C. 667-689.

88.Somers B. et al. Spectral mixture analysis to monitor defoliation in mixed-aged Eucalyptus globulus Labill plantations in southern Australia using Landsat 5-TM and EO-1 Hyperion data //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2010. – T. 12. – №. 4. – C. 270-277.

- 88.Rohan Fisher, Scott Heckbert, José María León Villalobos, Stephen Sutton. Augmenting physical 3D models with projected information to support environmental knowledge exchange. *Applied Geography* Volume 112, 2019 doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102095.
- 89.Razavi-Termeh S. V., Sadeghi-Niaraki A., Choi S. M. Ubiquitous GIS-based forest fire susceptibility mapping using artificial intelligence methods //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 10. – C. 1689.
- 90.Iizuka K., Yonehara, T., Itoh, M., & Kosugi, Y.. Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest //Remote Sensing. – 2017. – T. 10. – №. 1. – C. 13.
- 91.Chiba Y. Modeling Structural Development of Plantation Forests Addressing Diagnosis System of Forest Management (C: Forest information systems, e-forest, Poster presentation, Followup and New Challenge for Coming Generations, The Second International Conference on FORCOM, Abstract Proceedings of FORCOM2011) //Journal of Forest Planning. – 2012. – T. 17. – №. 2. – C. 69-70.
- 92.Akay A. E., Oğuz, H., Karas, I. R., & Aruga, K.Using LiDAR technology in forestry activities //Environmental monitoring and assessment. – 2009. – T. 151. – №. 1. – C. 117-125.
- 93.Hirose Y., Numamoto S., Matsumura N. Information Acquisition of Forest Resources Using Photographing from UAV: Case Study in the Mie University Forest, Hirakura //Journal of Forest Planning. – 2018. – T. 22. – №. 2. – C. 33-37.
- 94.Juvanhhol R. S. et al. Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk //Anais da Academia Brasileira de Ciências. – 2021. – T. 93.
- 95.Gomes M. F., Maillard P. Integration of marked point processes and template matching for the identification of individual tree crowns in an urban and a wooded savanna environment in Brazil //Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications V. – SPIE, 2014. – T. 9245. – C. 220-231.

- 96.Krause G. et al. Mapping land-cover and mangrove structures with remote sensing techniques: A contribution to a synoptic GIS in support of coastal management in North Brazil //Environmental management. – 2004. – T. 34. – №. 3. – C. 429-440.
- 97.Moreira R. M., Santos C. O. D. Flood risk assessment and management for urban areas in Brazilian Pantanal using free and open source GIS software //International Journal of Risk Assessment and Management. – 2020. – T. 23. – №. 2. – C. 191-206.
- 98.Oliveira D. S. et al. Fire risk mapping for pine and eucalyptus stands in Três Barras, State of Santa Catarina, Brazil //Forest fire research & wildland fire safety: proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research [and]. – 2002.
- 99.Martins T. D. et al. Assessment of Lidar-derived DTMs for landslide susceptibility mapping: Application in the Brazilian subtropical forest //Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. – CRC Press, 2018. – C. 1389-1392.
- 100.Y. E. Shimabukuro, V. Duarte, J. R. dos Santos and G. T. Batista, "Mapping and monitoring deforestation areas in Amazon region using semi-automatic classification of Landsat Thematic Mapper images," IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120), 2000, pp. 1999-2001 vol.5, doi: 10.1109/IGARSS.2000.858226.
101. Reis, B.P.; Martins, S.V.; Fernandes Filho, E.I.; Sarcinelli, T.S.; Gleriani, J.M.; Marcatti, G.E.; Leite, H.G.; Halassy, M. Management Recommendation Generation for Areas Under Forest Restoration Process through Images Obtained by UAV and LiDAR. Remote Sens. 2019, 11, 1508. <https://doi.org/10.3390/rs11131508>
- 102.Silva F. et al. Classification of forest roads and determination of route using geographic information system //Revista Árvore. – 2016. – T. 40. – C. 329-335.
- 103.Lemenkova P. Sentinel-2 for high resolution mapping of slope-based vegetation indices using machine learning by Saga GIS //Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research. – 2020. – T. 22. – №. 3. – C. 17-34.

- 104.Verhegghen A. et al. Review and combination of recent remote sensing based products for forest cover change assessments in Cameroon //International Forestry Review. – 2016. – Т. 18. – №. 1. – С. 14-25.
- 105.Bourbier L. et al. Large-scale estimation of forest canopy opening using remote sensing in Central Africa. – 2013.
- 106.Ledo A. et al. Review of spatial indices used in forest inventory and their application in tropical forests //Revista Peruana de Biologia. – 2012. – Т. 19. – №. 1. – С. 113-124.
- 107.Hermann Thora M. Uncontrolled Draining of Rainwater and Health Consequences in Yaoundé–Cameroon.
- 108.Ngueguim J. R. et al. Evaluation of logging impacts on tropical rainforest in Eastern Cameroon using Remote Sensing and GIS techniques //International Journal of Biological and Chemical Sciences. – 2009. – Т. 3. – №. 4.
- 109.Fétéké F. et al. Modéliser la croissance de quatre essences pour améliorer la gestion forestière au Cameroun //BOIS & FORETS DES TROPIQUES. – 2015. – Т. 325. – С. 5-20.
- 110.McCall M. K., Minang P. A. Assessing participatory GIS for community-based natural resource management: claiming community forests in Cameroon //Geographical Journal. – 2005. – Т. 171. – №. 4. – С. 340-356.
- 111.Robiglio V., Mala W. A., Diaw M. C. Mapping landscapes: Integrating GIS and social science methods to model human-nature relationships in southern Cameroon //Small-scale Forest Economics, Management and Policy. – 2003. – Т. 2. – №. 2. – С. 171-184.
- 112.Таксация леса. Учебное пособие/ И.В Никифорчин, Л.С. Ветров, С.В. Вавилов. - СПб.: СПбГПУ, 2011.
- 113.Ветров Л. С. Стрoение древостоев сосны в условиях лесопарка "Сосновка" / Л. С. Ветров, И. В. Никифорчин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – № 217. – С. 6-15. – DOI 10.21266/2079-4304.2016.217.6-15.

114. L. S. Vetrov, S. A. Suvorov, A. V. Safonov [et al.] The influence of the stand composition on the productivity of pine and spruce stands in different forest types on the territory of the Lisino Educational and Experimental Forestry Unit of the Leningrad Region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 6, Politics, Industry, Science, Education, St. Petersburg, 26–28 мая 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 012080. – DOI 10.1088/1755-1315/876/1/012080.
115. Вагизов М. Р. Технология интеллектуализации анализа космических снимков в лесной таксации / М. Р. Вагизов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2019. – № 1(33). – С. 94-98.
116. Вагизов М. Р. Инвентаризация лесов на основе обработки технологий интеллектуального анализа геоданных / М. Р. Вагизов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы третьей международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 года / Под редакцией В.М. Гедьо. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2018. – С. 46-49.
117. Вагизов М. Р. Разработка интерактивных геоинформационных систем: принципы построения и конструирования системы / М. Р. Вагизов // Информационные системы и технологии: теория и практика : Сборник научных трудов научно-технической конференции института леса и природопользования, Санкт-Петербург, 01 февраля 2017 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2017. – С. 21-27.
118. Вагизов М. Р. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 1) / М. Р. Вагизов // Геоинформатика. – 2021. – № 4. – С. 43-49. – DOI 10.47148/1609-364X-2021-4-43-49.
119. К. В. Конжголадзе, М. Р. Вагизов. Модель локальной геоинформационной системы для особо охраняемых природных территорий // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве : Материалы IV международной научно-практической

конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2020. – С. 129-133.

120.Вагизов М. Р. Цифровое геомоделирование лесов: новый этап анализа данных о лесных экосистемах / М. Р. Вагизов // Сборник научных трудов Совета молодых ученых СПбГЛТУ. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 4-8.

121.Мирущенко А. Ю. Quantum computers / А. Ю. Мирущенко, И. Г. Попова, Н. Скворцова // Информационно-коммуникативная культура: наука и образование : сборник статей, Ростов-на-Дону, 15 мая 2019 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2019. – С. 165-168.

122.Соловьев В. М. Квантовые компьютеры и квантовые алгоритмы / В. М. Соловьев // Информационные технологии в образовании, Саратов, 02–03 ноября 2015 года / Саратовский государственный университет. – Саратов: ООО "Издательский центр "Наука", 2015. – С. 75-93.

123.Бетеров И. И. Квантовые компьютеры на "холодных атомах" / И. И. Бетеров // Наука из первых рук. – 2014. – № 3-4(57-58). – С. 188-191.

124.Герман В. А. Квантовые компьютеры / В. А. Герман, И. Г. Черных // Уральская горная школа - регионам : сборник докладов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 24–25 апреля 2017 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2017. – С. 932-933.

125.Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления / К. А. Валиев // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175. – № 1. – С. 3-39.

126.Rabl P. et al. Hybrid quantum processors: molecular ensembles as quantum memory for solid state circuits //Physical review letters. – 2006. – Т. 97. – №. 3. – С. 033003.

127. Hillery M., Bužek V., Ziman M. Probabilistic implementation of universal quantum processors // *Physical Review A*. – 2002. – Т. 65. – №. 2. – С. 022301.
128. Boothby K. et al. Next-generation topology of d-wave quantum processors // *arXiv preprint arXiv:2003.00133*. – 2020.
129. Acampora G., Vitiello A. Implementing evolutionary optimization on actual quantum processors // *Information Sciences*. – 2021. – Т. 575. – С. 542-562.
130. Nersisyan A. et al. Manufacturing low dissipation superconducting quantum processors // *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. – IEEE, 2019. – С. 31.1. 1-31.1.
131. Вершинин Н. Н. Матрично-графовое моделирование природно-технических систем / Н. Н. Вершинин, В. В. Костиневич // *Труды международного симпозиума "Надежность и качество"*. – 2009. – Т. 1. – С. 323-325
132. А. А. Макаренко, А. Г. Карманов, Н. А. Карманова, Л. А. Винокуров. Модели движения селевых потоков в природнотехнических системах // *Цифровые технологии в лесном секторе : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 26–27 марта 2020 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 96-99.
133. Буфеев Ф. К. Моделирование оползней скольжения, приуроченных к склонам исторических природно-технических систем, сложенных техногенными грунтами : специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Буфеев Федор Константинович. – Москва, 2016. – 22 с.
134. Зинюков Ю. М. Методические основы конструирования и анализа структурно-иерархических моделей природно-технических экосистем / Ю. М. Зинюков // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2001. – № 11. – С. 210-222.

- 135.Е. А. Байков, В. Н. Завгородний, Е. П. Истомин [и др.] Нормативно-распорядительное обеспечение геоинформационного управления развитием природно-технических систем // Информация и космос. – 2022. – № 2. – С. 143-149.
- 136.Е. П. Истомин, В. Л. Михеев, Я. А. Петров, И. А. Мартын. Геомоделирование предельного усиления цуга волн при выходе на шельф // Информация и космос. – 2021. – № 3. – С. 78-85.
- 137.Д. А. Данилов, Н. В. Беляева, Д. А. Зайцев, И. М. Анисимова. Таксационные показатели и товарная структура спелых смешанных древостоев сосны и ели в зеленомошных типах леса // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2(46). – С. 14-29. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/2.
- 138.Беляева Н. В. Оценка эффективности оставления семенных деревьев на вырубках в различных типах леса / Н. В. Беляева, Н. С. Сорокина, Д. А. Данилов // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2022. – № 61. – С. 6-12.
139. А. С. Сергеева, Н. В. Беляева, Д. А. Данилов, И. А. Кази. Формирование подроста лесообразующих пород в зависимости от структурных особенностей живого напочвенного покрова на постагrogenных землях в Ленинградской области // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 26–28 мая 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 156-158.
- 140.Беляева Н. В. Изучение смены пород на вырубках в зависимости от типа леса в Ленинградской области / Н. В. Беляева, Д. А. Филиппова, Д. А. Данилов // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2021. – № 60. – С. 10-16.
- 141.Грязькин, А. В. Динамика роста молодого поколения сосны на гарях / А. В. Грязькин, О. И. Гаврилова, Ю. В. Ольхин // Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства : Научно-практическая конференция, Воронеж, 21–22 октября 2021 года. – Воронеж:

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 321-324.

142.Т. Чан Чунг, А. В. Грязькин, Н. В. Беляева [и др.] Сравнительная оценка структуры и запасов древесных и недревесных ресурсов березняков и ельников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2020. – № 233. – С. 19-38. – DOI 10.21266/2079-4304.2020.233.19-38.

143.Смирнов А. П. Естественное возобновление сосны на вырубках Среднего Приангарья в связи с особенностями лесной почвы / А. П. Смирнов, А. А. Смирнов, П. В. Богачев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. – № 235. – С. 103-118. – DOI 10.21266/2079-4304.2021.235.103-118.

144. Ю. И. Данилов, А. П. Смирнов, С. В. Навалихин [и др.] Рост культур сосны в условиях рекультивированных песчаных карьеров // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2019. – № 1. – С. 40-53.

145.Смирнов, А. П. Продуктивность хвойных древостоев и естественное лесовозобновление на вырубках в связи с плодородием лесной почвы / А. П. Смирнов, А. А. Смирнов, Б. А. Д. Монгуш // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2018. – № 223. – С. 28-46. – DOI 10.21266/2079-4304.2018.223.28-46.

146.А. В. Любимов, А. В. Грязькин, А. Н. Крючков [и др.] Сценарии возможного развития лесов Новгородской области до 2080 года // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 2. – С. 45-53.

147.Матерухин А.В. Теоретические основы и методология обработки потоков пространственно-временных данных : специальность 25.00.35 "Геоинформатика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Матерухин Андрей Викторович. – Москва, 2018. – 48 с.

- 148.Шанин В. Н. Имитационное моделирование динамики лесных экосистем при различных лесохозяйственных и климатических сценариях: специальность 03.02.08 "Экология (по отраслям)": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Шанин Владимир Николаевич. – Сыктывкар, 2011. – 18 с.
- 149.Розенберг Г. С. Моделирование углеродного баланса лесных экосистем при глобальном потеплении / Г. С. Розенберг, Э. Г. Коломыц // Вестник экологического образования в России. – 2016. – Т. 1. – № 79. – С. 10-12.
- 150.Дубинский О. Б. Системно-динамическое моделирование состояния лесных экосистем и их взаимодействие с экономикой / О. Б. Дубинский // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 1. – С. 80-84.
- 151.Чжан С. А. Моделирование процессов развития и деградации лесных экосистем / С. А. Чжан, О. А. Пузанова // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 2(26). – С. 174-183.
- 152.Володченкова Л. А. Математическое моделирование мозаичности лесных экосистем / Л. А. Володченкова, А. К. Гуц // Математические структуры и моделирование. – 2020. – № 4(56). – С. 49-63. – DOI 10.24147/2222-8772.2020.4.49-63.
- 153.Гурьянов М. О. Моделирование роста, дифференциации и строения древостоев сосны обыкновенной и ели европейской (на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза) : специальность 06.03.02 "Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация" : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Гурьянов Михаил Олегович. – Санкт-Петербург, 2002. – 135 с.
- 154.Алексеев А.С. Мониторинг лесных экосистем. СПб.: ЛТА, 2003. 114 с
- 155.Mäkelä A. et al. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation //Tree physiology. – 2000. – Т. 20. – №. 5-6. – С. 289-298.

- 156.Шелехов А. Н. Трехмерное геолого-геофизическое моделирование Озернинского полиметаллического рудного узла по результатам комплексной геологической интерпретации геофизических данных : специальность 25.00.11 "Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения", 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Шелехов Антон Никитич. – Санкт-Петербург, 2010. – 20 с.
- 157.Дубровский А. В. Трехмерное моделирование экологического состояния объектов недвижимости в городском пространстве / А. В. Дубровский // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – 2020. – № 11. – С. 167-170.
- 158.Майоров А. А. Трехмерное геоинформационное моделирование при массовом сборе информации / А. А. Майоров, В. Я. Цветков, О. А. Андреева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – № 2. – С. 229-236. – DOI 10.30533/0536-101X-2020-64-2-229-236.
- 159.А. П. Барабаш, Д. А. Иванов, Ю. А. Барабаш, И. А. Норкин Компьютерное трехмерное моделирование бедренной кости человека и стержней для остеосинтеза // Инновационные имплантаты в хирургии : Сборник трудов, Пенза, 17–19 января 2014 года. – Пенза: Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН, 2014. – С. 214-220.
160. Шигапова Д. Ю. Трехмерное моделирование для недропользователя: эволюция, современные подходы и перспективы / Д. Ю. Шигапова, Е. Ю. Волк // Недропользование XXI век. – 2020. – № 4(87). – С. 144-151.
- 161.Ландэ Д. В. Моделирование динамики информационных потоков / Д. В. Ландэ // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-3. – С. 652-654.
- 162.Геоинформационно-когнитивная репрезентация территориальных ресурсов / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий, А. Г. Осипов, В. Н. Савиных // Вестник СГУГиТ

- (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 120-129. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-120-129.
- 163."Лесной кодекс Российской Федерации" от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 30.12.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022)
- 164.Официальный сайт. РБК.Что такое цифровые двойники и где их используют. Статья <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb>
- 165.Вагизов М. Р. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 2) / М. Р. Вагизов, Е. П. Истомин // Геоинформатика. – 2022. – № 1. – С. 40-46. – DOI 10.47148/1609-364X-2022-1-40-46.
- 166.Ткачева А. А. Использование данных дистанционного зондирования Земли при трехмерном моделировании естественных ландшафтных сцен / А. А. Ткачева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2014. – № 5(57). – С. 136-144.
- 167.Казимерчик Е. Н., Червань А. Н. Трехмерное моделирование и оценка условий произрастания зеленых насаждений средствами ArcGIS на примере Центрального ботанического сада г. Минска. – 2016.
- 168.Shen, X.; Huang, Q.; Wang, X.; Li, J.; Xi, B. A Deep Learning-Based Method for Extracting Standing Wood Feature Parameters from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds of Artificially Planted Forest. Remote Sens. 2022, 14, 3842. <https://doi.org/10.3390/rs14153842>
- 169.Тойиров М. И. Нейросетевая обработка данных дистанционного зондирования Земли / М. И. Тойиров // Актуальные проблемы науки и техники. 2018 : Материалы национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 12–14 марта 2018 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2018. – С. 390-391.
- 170.Васильченко В. А. Повышение качества и оперативности идентификации специальных состояний мониторируемых объектов на основе разработки математического и программного обеспечения обработки компьютерных изображений с использованием больших баз данных / В. А. Васильченко В. Л.

Бурковский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. – № 2(29). – DOI 10.26102/2310-6018/2020.29.2.030.

171.Сулавко А. Е. Перспективные нейросетевые алгоритмы распознавания динамических биометрических образов в пространстве взаимозависимых признаков / А. Е. Сулавко, С. С. Жумажанова, Г. А. Фофанов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6. – № 4. – С. 130-145. – DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-4-130-145.

172.Intel объявила о готовности к массовому производству квантовых процессоров на кремниевых кубитах. Современная электроника №4 (2022) стр. 13. https://pubhtml5.com/afmpv/umrk/Современная_электроника_№4

173.Ткачева А. А. Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам / А. А. Ткачева, М. Н. Фаворская // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6(79). – С. 40-49. – DOI 10.15217/issn1684-8853.2015.6.40.

174.Черниховский Д.М. Теория и методы инвентаризации лесов на основе данных дистанционного зондирования земли, цифрового моделирования рельефа и ГИС-технологий: специальность 06.03.02 "Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Черниховский Дмитрий Михайлович. – Санкт-Петербург, 2019. – 40 с.

175. Д. А. Никишин, Подход к совершенствованию концептуальных схем баз геоданных посредством моделей для пространственно-логического связывания геообъектов, Системы и средства информ., 2021, том 31, выпуск 1, 157–167. DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527210113>

176.Ю. А. Паутов, А. Ю. Боровлев, А. Т. Загидуллина, Е. А. Титов. Методика выделения ВПЦ 3 "темнохвойные (еловые, елово-пихтовые) старовозрастные леса с участием неморальных видов трав (пихтоельники)" в Республике коми // Устойчивое лесопользование. – 2021. – № 3(67). – С. 15-16. – DOI 10.47364/2308-541X202167315.

- 177.Шамро Е. Н. Разработка графической анимации алгоритмов сортировки числовых массивов / Е. Н. Шамро, Ю. Г. Егорова // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов : материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 01–15 апреля 2016 года / Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет; Э.А. Дмитриев (отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2016. – С. 653-655.
- 178.Габеева Д. А. Разработка картографических изображений с применением анимации в ГИС-приложении QGIS / Д. А. Габеева, П. В. Коновалов, В. П. Халагаев // Естественные и технические науки. – 2021. – № 9(160). – С. 93-97. – DOI 10.25633/ETN.2021.09.07.
- 179.Лыткин И. И. Разработка интерактивных технологий трехмерной визуализации и анимации для электронной коммерции : специальность 08.00.13 "Математические и инструментальные методы экономики" : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Лыткин Иван Игоревич. – Москва, 2007. – 133 с.
- 180.Чернышов Л. Н. Исследование и разработка методов моделирования и анимации трехмерных объектов / Л. Н. Чернышов, Е. Д. Захарова // Моделирование и анализ данных. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 53-59. – DOI 10.17759/mda.2020100304.
- 181.Добрынин Д. Лисинское учебно-опытное лесничество Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета / Д. Добрынин, С. Третьяков // Примеры отечественного опыта устойчивого лесоуправления и лесопользования. – Москва : Всемирный фонд дикой природы, 2013. – С. 97-109.
- 182.Аникин А. С. Учебное лесничество - от прошлого к будущему? / А. С. Аникин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы научно-технической конференции., Санкт-Петербург, 13–15 апреля 2016 года / Под. ред. В.М. Гедьо. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский

государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2016. – С. 20-25.

183.А. С. Аникин, В. Ф. Ковязин История создания учебно-опытных лесхозов Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова // Роль учебно-опытных лесхозов вузов России в подготовке кадров для лесного сектора : Материалы научно-практической конференции, Брянск, 21–23 сентября 2017 года. – Брянск: Брянская государственная инженерно-технологическая академия, 2017. – С. 59-64.

184.Алексеев А. С. Динамика лесного фонда Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области с 1993 по 2022 год по данным лесоустройства / А. С. Алексеев, А. Ж. Сатаев // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25–27 мая 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 9-12.

185.Редько Г. И. Лисинскому учебно-опытному лесхозу 200 лет / Г. И. Редько // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2005. – № 5. – С. 148-151.

186.Чунина А. А. Имитационное моделирование воздействия ветра на 3D-модель дерева / А. А. Чунина, М. Н. Фаворская // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – Т. 1. – № 7. – С. 378-379.

187.Архипов Б. В. Трехмерное моделирование обтекания гидротехнических сооружений на океаническом шельфе / Б. В. Архипов, В. Н. Котеров, В. В. Солбаков ; Б. В. Архипов, В. Н. Котеров, В. В. Солбаков. – Москва : Вычисл. Центр им. А. А. Дородницына РАН (ВЦ РАН), 2004. – 27 с. – (Сообщения по прикладной математике/ Рос. акад. наук, Вычисл. центр им. А. А. Дородницына).

188.Шульц С. В. Трехмерное моделирование геометрии взволнованной морской поверхности на основе технологии WebGL / С. В. Шульц, А. В. Липис, Д. А.

Липис // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 2.

189.Дубровский А. В. Трехмерное моделирование экологического состояния объектов недвижимости в городском пространстве / А. В. Дубровский // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – 2020. – № 11. – С. 167-170.

190.Шелехов А. Н. Трехмерное геолого-геофизическое моделирование Озернинского полиметаллического рудного узла по результатам комплексной геологической интерпретации геофизических данных : специальность 25.00.11 "Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения", 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Шелехов Антон Никитич. – Санкт-Петербург, 2010. – 20 с.

191.Kapitsa L. M. Climate Change and Micro, Small and Medium Enterprises / L. M. Kapitsa // MGIMO Review of International Relations. – 2020. – Vol. 13. – No 4. – P. 216-231. – DOI 10.24833/2071-8160-2020-4-73-216-231.

192.О. А. Дубровская, А. А. Леженин, В. М. Мальбахов, В. А. Шлычков. Влияние лесных пожаров на климатические и ландшафтные изменения в Азиатской части России / // Гео-Сибирь. – 2006. – Т. 3. – № 2. – С. 108-112.

193.Братков В. В. Реакция геосистем большого Кавказа на современные климатические изменения (по материалам дистанционного зондирования земли) / В. В. Братков, Ш. Ш. Заурбеков, З. В. Атаев // Эффективное развитие горных территорий России : Горный форум - 2016: материалы международной научно-практической конференции, Махачкала, 26–29 июля 2016 года. – Махачкала: ГАОУ ВПО "Дагестанский государственный институт народного хозяйства", 2016. – С. 110-119.

194.Карякин В. А. Вырубка лесов, с какими проблемами сталкивается Россия / В. А. Карякин, Г. А. Лепин // Colloquium-Journal. – 2019. – № 11-5(35). – С. 174-175.

- 195.Толмачев К. С. Вырубка лесов Амазонии: последствия и предотвращение / К. С. Толмачев, К. К. Евсюгин // Молодой ученый. – 2019. – № 6(244). – С. 69-72.
- 196.С. А. Мерзук, Т. А. Герасимова, Е. Д. Шкуренок [и др.] Оценка потери лесопокрытой площади Иркутской области с помощью картографических web-сервисов // Актуальные вопросы лесного хозяйства : материалы V международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2021 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 123-126.
- 197.Silva Junior, C. H., Pessoa, A., Carvalho, N. S., Reis, J. B., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. (2021). The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nature Ecology & Evolution*, – 2021. – Т. 5. – №. 2. – С. 144-145.
- 198.Официальный сайт компании Совзонд.
<https://sovzond.ru/services/geomodelirovanie/>
199. Флеминг Б. Моделирование растений и насекомых : пер. с англ. - М.: ДМК Пресс, 2002. -320 с.: ил.
- 200.Официальный сайт компании Topodrone. Воздушное лазерное сканирование лесных и горных участков местности, автоматическая классификация облака точек, построение горизонталей. Режим доступа: URL - <https://topodrone.ru/blog/1184/>
- 201.Вагизов М. Р. Разработка базы данных трехмерных моделей хвойных лесообразующих пород сосны и ели обыкновенной для геоинформационной модели лесной экосистемы / М. Р. Вагизов // Информация и космос. – 2022. – № 2. – С. 162-167.
202. Вагизов М. Р., Шишкин М., Истомин Е.П., Новикова М.А.,Бойцов А.К. Разработка базы данных трехмерных моделей лиственных лесообразующих пород Берёзы повислой и Осины обыкновенной для геоинформационной модели

лесной экосистемы / М. Р. Вагизов // Геоинформатика. – 2022. – № 3. – С. 39-46.
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-3-39-46>

203. М. А. Новикова, А. В. Грязькин, Я. А. Новиков [и др.] Структура и состояние подроста березы под пологом древостоев // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 5. – С. 58-63.

204. А. К. Бойцов, А. В. Жигунов, А. А. Григорьев, А. С. Бондаренко Оценка перспективности использования клонов гибридных тополей и осины для плантационного лесовыращивания в условиях Северо-Запада России // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы третьей международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 года / Под редакцией В.М. Гедьо. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2018. – С. 40-43.

205. Бойцов А. К. Использование искусственных нейронных сетей для определения перспективности использования клонов гибридных пород древесины для плантационного лесовыращивания / А. К. Бойцов, А. А. Логачев, Х. Г. Мусин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. – № 237. – С. 288-298. – DOI 10.21266/2079-4304.2021.237.288-298

206. Новикова М. А. Особенности естественного возобновления березы в условиях Ленинградской и Тверской областей : специальность 06.03.02 "Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Новикова Мария Александровна. – Санкт-Петербург, 2016. – 22 с.

207. М. Р. Вагизов, Е. П. Истомин, О. Н. Колбина [и др.] Разработка интеллектуальной геоинформационной системы для отрасли лесного хозяйства // Геоинформатика. – 2021. – № 3. – С. 4-13. – DOI 10.47148/1609-364X-2021-3-4-13.

- 208.Вагизов М. Р. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 3) / М. Р. Вагизов // Геоинформатика. – 2022. – № 2. – С. 34-41. – DOI 10.47148/1609-364X-2022-2-34-41.
- 209.Кириенко А. В. Модели и методики информационного обеспечения геоинформационной системы поиска техногенного мусора на основе воздушной видеоспектральной съемки: специальность 25.00.35 "Геоинформатика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кириенко Андрей Васильевич. – Санкт-Петербург, 2022. – 28 с.
- 210.Вагизов М.Р. Разработка интерактивного картографического сервиса для определения лесотаксационных показателей насаждений программно-техническим методом» специальность 25.00.35 "Геоинформатика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вагизов Марсель Равильевич. – Санкт-Петербург, 2022. – 24 с.
211. Приемская Е. Интернет-издание. Известия. Общество. «Мы не видим, чем мы управляем». Аудитор Счетной палаты Михаил Мень — об основной проблеме российских лесов и о цене ее решения. 20 августа 2020 года. URL: режим доступа <https://iz.ru/1049186/evgeniia-priemskaja/my-ne-vidim-chem-my-upravliaem>
212. К. В. Лабоха, Д. В. Шиман. Лесоводство : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство» / – Минск : БГТУ, 2015. – 440 с.
213. Д.М. Киреев Эколого-географические термины в лесоведении: [словарь-справочник]. Изд-е 2-е, доп. и расш. СПб.:СПбГЛТУ, 2016. 656 с.
214. Вагизов М. Р. Web-картография : Учебное пособие по организации лабораторных работ студентов Института леса и природопользования по направлению 09.03.02 «Информационные системы и технологии» / М. Р. Вагизов. – Санкт-Петербург : Свое издательство, 2020. – 76 с. – ISBN 978-5-4386-1880-5.

215. Н. П. Васильев, М. Р. Вагизов Рендеринг регулярной сетки высот рельефа местности с помощью WebGL и естественной триангуляции // Геодезия и картография. – 2022. – Т. 83, № 12. – С. 49-56. – DOI 10.22389/0016-7126-2022-990-12-49-56.
- 216.
217. О. Н. Колбина, Е. А. Кушаков, Д. С. Матюхин, Н. В. Яготинцева Анализ методов визуализации объектов реального мира в ГИС // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022) : Сборник научных статей XI Международной научно-технической и научно-методической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 февраля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. – С. 289-294.
218. Абдулхаков А. В. Технология WebGL / А. В. Абдулхаков, В. Ю. Кондратьев // Информационное общество: современное состояние и перспективы развития : Сборник материалов XI международного студенческого форума, Краснодар, 23–27 июля 2018 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. – С. 120-123.
219. Григорьев А. И., Колмогорова С.С. Особенности виртуальной реализации редко встречающихся объектов электронно-вычислительной техники // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2022. – № 2(42). – С. 53-62.
220. Хусаинова К. И. Моделирование трехмерных фигур с помощью WebGL / К. И. Хусаинова, А. Н. Вильданов // Достижения и приложения современной информатики, математики и физики : материалы VII Всероссийской научно-практической заочной конференции, Нефтекамск, 30 ноября 2018 года. – Нефтекамск: Башкирский государственный университет, 2018. – С. 526-533.
221. В. И. Архипов, Д. М. Черниковский, В. И. Березин. Опыт таксации лесов дешифровочным способом на основе современного программно-аппаратного

обеспечения и цифровых аэроснимков нового поколения // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 5. – С. 29-37.

222. Архипов В.И., Березин В.И., Черниковский Д.М. Новая технология стереоскопической таксации лесов «от съемки - к проекту». Геопрофи: научно-технический журнал по геодезии, картографии и навигации. 2014. № 4. С. 17.

223. В. И. Березин, Д. М. Черниковский. Опыт лесного стереодешифрирования с применением специального программно-аппаратного обеспечения и ГИС-технологий для целей выполнения работ по государственной инвентаризации лесов в объектах с наличием труднодоступных территорий // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 3. – № 4. – С. 112-121.

224. Brach M. Rapid Static Positioning Using a Four System GNSS. Receivers in the Forest Environment. Forests. 2022; 13(1):45. <https://doi.org/10.3390/f13010045>

225. Ткачева А. А. 3D-моделирование влияния внешних параметров окружающей среды на объекты с ветвящейся структурой в сложной сцене / А. А. Ткачева // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 31-34.

226. Prusinkiewicz Przemysław; Aristid Lindenmayer. The Algorithmic Beauty of Plants (The Virtual Laboratory) — Springer-Verlag, 1990. — ISBN 0-387-97297-8.

227. М. А. Николаева, А. В. Жигунов, А. М. Голиков 36-летний опыт изучения географических культур сосны обыкновенной в Псковской области // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2016. – № 5(353). – С. 22-33. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2016.5.22.

228. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621192 Российская Федерация. Трёхмерные модели хвойных пород деревьев Лисинского учебно-опытного лесничества : № 2022621098 : заявл. 19.05.2022 : опубл. 25.05.2022 / М. Р. Вагизов, А. Р. Сулимова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».

229. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621192 Российская Федерация. Трёхмерные модели лиственных пород деревьев Лисинского учебно-опытного лесничества : № 2022621098: заявл. 15.12.2022 : опубл. 25.12.2022 / М. Р. Вагизов, С. А. Мерзук; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».
230. Л. А. Хитрик, М. Р. Вагизов Разработка методики геоинформационного моделирования лесного квартала // Актуальные вопросы лесного хозяйства : материалы V международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2021 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова: 2021. – С. 191-195.
231. Зуев В. Н. Модифицированный алгоритм обучения нейронных сетей / В. Н. Зуев, В. К. Кемайкин // Программные продукты и системы. – 2019. – № 2. – С. 258-262.
232. В. А. Кульбида, А. И. Фенглер, Р. Ф. Фенинец Алгоритм обучения искусственных нейронных сетей прямого распространения // Динамика систем, механизмов и машин. – 2004. – № 1. – С. 385-387.
233. А. С. Довбыш, А. А. Стадник, М. С. Руденко. Информационно-экстремальный алгоритм обучения системы диагностирования инфекционных патологий // Кибернетика и вычислительная техника. – 2013. – № 2(172). – С. 29-38.
234. Левшун Д.С., Чечулин А.А., Котенко И.В. Комплексная модель защищенных киберфизических систем для их проектирования и верификации // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 114–123. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-114-123

235. М. Р. Вагизов. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 2) / М. Р. Вагизов, Е. П. Истомин // Геоинформатика. – 2022. – № 1. – С. 40-46. – DOI 10.47148/1609-364X-2022-1-40-46.
236. Жалнин В.С., Вагизов М.Р. Геоинформационное моделирование изменений классов возраста Берёзы обыкновенной. // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве : Материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Полиграф-Экспресс, 2022. – С. 192-196.
237. О. А. Андреева, С. Г. Дышленко. Геоинформационное проектирование трехмерных объектов // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – № 1(11). – С. 39-46.
238. Vagizov M. R. Determination of the forest inventory indicators according to the photographs of the unmanned aerial vehicles / M. R. Vagizov, V. A. Ustyugov, D. O. Kvochkin // Ecology, Environment and Conservation. – 2017. – Vol. 23. – No 1. – P. 582-586.
239. Roudavski S. Towards Morphogenesis in Architecture // International Journal of Architectural Computing. 2009. – Vol. 7. – No 3. – P. 345—374.
240. М. Р. Вагизов. Машинное обучение в задаче инвентаризации лесных насаждений. // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, 2018.
241. А. П. Потапов, М. Р. Вагизов. Технологии машинного обучения и обработки таксационных данных для визуализации геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 1) // Информация и космос. – 2022. – № 3. – С. 125-129.
242. Я. А. Петров, С. Ю. Степанов, М. Р. Вагизов, В. Ю. Кардаполова. О тенденциях использования NoSQL и big-data в современных геоинформационных системах // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2020. – № 1(37). – С. 141-146.

243. Э. А. Белоусова, Ю. Н. Жуков, Ю. П. Коровяковский. Технология трехмерной визуализации геопространственных объектов и полей // Навигация и гидрография. – 2009. – № 28. – С. 93-99.
244. А. Захарова, А. Шкляр. Основные принципы построения визуальных моделей данных на примере интерактивных систем трехмерной визуализации // Научная визуализация. – 2014. – Т. 6. – № 2. – С. 62-73.
245. А. В. Гречищев, В. Ю. Савинский, Е. В. Стоволосов. О современных технологиях многомерного моделирования объектов и местности по данным дистанционного зондирования: аэро- и космическим часть 1 // Экология. Экономика. Информатика : сборник статей: в 2-х томах / Институт аридных зон, Южный научный центр РАН, Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Южный научный центр РАН, 2016. – С. 222-234.
246. Официальный сайт. Виртуальный глобус Satellite Explorer/ Режим доступа: <https://geoxc-apps.bd.esri.com/space/satellite-explorer/#>
247. В. Б. Бритков, В. А. Геловани, Ю. В. Ноздрин. Интеллектуальный анализ информации о природной среде на примере океанологических данных // Региональные риски чрезвычайных ситуаций и управление природной и техногенной безопасностью муниципальных образований : Материалы девятой Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, Москва, 20–21 апреля 2004 года / Центр стратегических исследований гражданской защиты МЧС России. – Москва: ООО "Издательство "Триада", 2004. – С. 443-447.
248. Звягин Л. С. Интеллектуальный анализ данных: Big data и data science / Л. С. Звягин // Мягкие измерения и вычисления. – 2022. – Т. 54. – № 5. – С. 81-90. – DOI 10.36871/2618-9976.2022.05.006.
249. Интеллектуальный анализ больших объемов данных телеметрии малых космических аппаратов / В. Ю. Скобцов, Н. А. Новоселова, В. Б. Алешкевич, В. И. Архипов // Big Data and Advanced Analytics. – 2016. – № 2. – С. 173-174.

250. Ли С. Модели, методы и алгоритмы больших данных и интеллектуальный анализ данных / С. Ли // Актуальные исследования. – 2022. – № 30(109). – С. 17-20.
251. Vagizov M.R., Dobrovolskyi A.A., Istomin E.P., Yagotintceva N.V., Zhernova A.P. Technological aspects of the development of the automated method of air-photo interpretation of forest stands // IOP conference series: Earth and environmental science. – 2020. –Vol. 574. V Pan-Russian Scientific Technical Conference – Webinar “Forests of Russia: Policy, Industry, Science and Education” (Saint Petersburg, 16–18 June 2020). – 574 012023. DOI:10.1088/1755-1315/574/1/012023
252. Vagizov M., Potapov A., Navalikhin S., Bakayeva A., Stepanov S. Application of ensemble machine learning methods for modeling the heights of individual forest elements based on inventory data processing. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 806. II All-Russian scientific-technical conference “Digital Technologies in Forest Sector” (Russia, St. Petersburg, 18–19 March 2021). 2021;806:012035. DOI 10.1088/1755-1315/806/1/012035.
253. Городничев, Д. Ю. Машинное обучение и глубокое обучение / Д. Ю. Городничев // Современные проблемы лингвистики и методики преподавания русского языка в ВУЗе и школе. – 2022. – № 38. – С. 278-281.
254. Belin, N. O. Machine learning / N. O. Belin // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2019. – No 18. – Р. 22-23.
255. Prudius, A. A. Analysis of machine learning methods to improve efficiency of big data processing in Industry 4.0 / A. A. Prudius, A. A. Karpunin, A. I. Vlasov // Journal of Physics: Conference Series: International Conference "Information Technologies in Business and Industry" - 2 - Mathematical Simulation and Computer Data Analysis, Novosibirsk, 13–15 февраля 2019 года. – Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – Р. 032065. – DOI 10.1088/1742-6596/1333/3/032065.
256. Негодин В. А. Машинное обучение в языке программирования Python / В. А. Негодин // Форум молодых ученых. – 2019. – № 8(36). – С. 201-203.

257. M. Vagizov, A. Potapov, S. Navalikhin [et al.] Application of ensemble machine learning methods for modeling the heights of individual forest elements based on inventory data processing // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2, Saint Petersburg, Virtual, 18–19 марта 2021 года. – Saint Petersburg, Virtual, 2021. – P. 012035. – DOI 10.1088/1755-1315/806/1/012035.
258. M. Vagizov, A. Potapov, K. Konzhgoladze [et al.] Prepare and analyze taxation data using the Python Pandas library // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 6, Politics, Industry, Science, Education, St. Petersburg, 26–28 мая 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 012078. – DOI 10.1088/1755-1315/876/1/012078.
259. Bakulin, M.; Kreyndelin, V.; Melnik, S.; Sudovtsev, V.; Petrov, D. Equivalent MIMO Channel Matrix Sparsification for Enhancement of Sensor Capabilities. *Sensors* 2022, 22, 2041. <https://doi.org/10.3390/s22052041>
260. Заяц А.М., Хабаров С.П. Исследование алгоритма работы распределенной системы мониторинга лесных территорий. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – Вып. 229. – С. 243–254.
261. Vagizov M.R., Istomin E.P., Miheev V.L., Potapov A.P., Yagotinceva N.V. Visual digital forest model based on a Remote Sensing data and forest inventory data // *Remote Sensing*. - 2021. - Vol. 13. - No. 20. - 4092. DOI: 10.3390/rs13204092
262. Миронова Ю.Н. Новые методы виртуального моделирования в геоинформационных технологиях [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Наукоеведение». – 2016. – Т. 8, №5. – Режим доступа : <http://naukovedenie.ru/PDF/03TVN516.pdf>.
263. Истомин Е. П., Михеев В. Л., Петров Я. А., Мартын И. А. Моделирование волновых процессов на замкнутых акваториях мелководных районов // *Геоинформатика*. – 2021. – № 3. – С. 30–35. doi: 10.47148/1609-364X-2021-3-30-35.
264. Карпик А. П., Аврунев Е. И., Добротворская Н. И. и др. Организация системы геоинформационного мониторинга состояния земельных ресурсов

прибрежной зоны Новосибирского водохранилища // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 8. – С. 133–145. doi: 10.18799/24131830/2019/8/2219

265. Елшина Т. Е. Создание и использование 3D-модели горного рельефа для геоинформационного обеспечения туризма / Т. Е. Елшина, И. П. Кокорина, А. В. Сысоев // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 5. – С. 108-118. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-5-108-118.

266. Батырова К. С. История дополненной реальности и перспективы ее применения в картографии / К. С. Батырова, Я. Г. Пошивайло // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 5. – С. 99-107. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-5-99-107.

267. А. А. Широковская, М. А. Новикова. Обзор программного обеспечения при обработке материалов лесоустройства в камерально-полевых условиях // Информационные системы и технологии: теория и практика : сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 24 февраля 2021 года / – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 185-188.

268. Шаннаа А. А., Кулик Е. Н. Современные средства пространственного моделирования территории в ГИС, // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 6. – № 2. – С. 208-214. doi 10.33764/2618-981X-2019-6-2-208-214.

269. Карпик А. П., Мусихин И. А., Ветошкин Д. Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 155–163. doi: 10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.

270. Карпик А. П., Лисицкий Д. В., Осипов А. Г., Савиных В. Н. Геокогнитивные методы обеспечения анализа и прогнозирования социально-экономического развития территорий // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 128–140. doi: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-128-140.

271. Е. А. Байков, В. Н. Завгородний, Е. П. Истомин [и др.] Нормативно-распорядительное обеспечение геоинформационного управления развитием природно-технических систем // Информация и космос. – 2022. – № 2. – С. 143-149.
272. Е. П. Истомин, А. Г. Соколов, Т. А. Нигматулин. Методологические основы стратегического управления развитием социально-экономических систем и территорий // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2020. – № 3(39). – С. 45-53.
273. С. И. Биденко, И. С. Храмов, А. А. Бенгерт, И. С. Мучкаева Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) // Гидрометеорология и экология. – 2022. – № 68. – С. 508-524. – DOI 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524.
274. Е. Л. Бородин, С. И. Биденко, З. А. Гаевская [и др.] Геомоделирование территориальной морской активности в системе управления автономным судовождением // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 4(101). – С. 103-111. – DOI 10.34046/aumsuomtl01/14.
275. В. Л. Черных, Л. В. Черных, Д. В. Черных, С. А. Денисов Автоматизация назначения способа лесовосстановления при лесоустройстве // Проблемы организации лесоустройства и пути их решения : Материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора О. А. Харина, Мытищи, 14 апреля 2017 года / Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Мытищи: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-инновационный центр", 2017. – С. 82-87.
276. Черных В. Л., Чернов А.П. Автоматизированная подготовка лесной декларации в среде «АРМ-лесопользование» на примере Республики Мордовия // Инновации и технологии в лесном хозяйстве : Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 марта 2011 года. –

Санкт-Петербург: Федеральное бюджетное учреждение "Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства", 2011. – С. 177-182.

277. Заяц А. М., Скубак А.С. Решение задачи выбора координаторов беспроводной сенсорной сети системы мониторинга лесных территорий // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ : сборник статей II Международной научно-технической конференции в рамках Международного молодежного форума по лесопромышленному образованию (Лес-Наука-Инновации-2022), Минск, 06–09 декабря 2022 года / Белорусский государственный технологический университет, 2022. – С. 154-159.

278. Заяц А. М., Игнатьева Т.И. Модель беспроводной сенсорной сети системы мониторинга лесных территорий // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации : сборник статей III Международной научно-технической конференции: в 3 т., Минск, 03 декабря 2020 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2021. – С. 24-31.

279. Розенберг И. Н. Геоинформационное моделирование как фундаментальный метод познания // ПНиО. 2016. №3 (21).

280. Цветков В. Я. Геоинформационное моделирование // Информационные технологии. — 1999. — № 3. — С. 23–27.

281. Sarah Sra. Illegal logging in Cameroon. // Electronic source. University of British Columbia. URL: <https://cases.open.ubc.ca/illegal-logging-in-cameroon/> (Access mode: 01.02.2023)

282. Вагизов М.Р., Истомин Е.П., Колбина О.Н., Присяжнюк С.П., Соколов А.Г., Яготинцева Н. В. Введение в геоинформационное управление. Учебное пособие // СПб.: НП «БИУ» 2021. – 352 стр.

283. Д. А. Данилов, А. А. Яковлев, Д. А. Зайцев [и др.] Формирование смешанных древостоев сосны и ели на лесных и постагрогенных землях // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25–27 мая

- 2022 года. – Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 130-132.
284. А. А. Яковлев, Д. А. Данилов, И. А. Крылов [и др.] Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагrogenных землях / // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25–27 мая 2022 года. – Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 418-421.
285. В. Ю. Кисляков Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615860 Российская Федерация. Полевой АРМ Таксатора: № 2021612881: заявл. 09.03.2021: опубл. 13.04.2021 / В. Ю. Кисляков; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Рослесинфорг».
286. Лизунов, А. А. суперкомпьютер / А. А. Лизунов // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 16(50). – С. 9-11.
287. Xu J, Li F, Hou M, Wang P. swAFL: A Library of High-Performance Activation Function for the Sunway Architecture. // Electronics. 2022; 11(19):3141. <https://doi.org/10.3390/electronics11193141>
288. С. В. Булгаков. Геоинформационное моделирование и информационное взаимодействие. // Конструкторское Бюро. – 2018. – № 2.
289. Бучкин В. А. Цифровое моделирование и геоинформационное моделирование / В. А. Бучкин // Славянский форум. – 2020. – № 2(28). – С. 15-23.
290. Галеев А. П. Геоинформационное прикладное моделирование / А. П. Галеев // Славянский форум. – 2022. – № 2(36). – С. 86-93.
291. Сергеев А.П., Буторова А.С., Шичкин А.В., Буевич А.Г., Баглаева Е.М., Субботина И.Е. Применение перестановочного метода к оценке прогностической способности моделей пространственного распределения концентраций меди и железа в верхнем слое почвы // Геоинформатика №2 (2022) <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-2-42-53>

292. Суханов С. И. Математическое моделирование пространственного положения геообъектов и интервальное оценивание его точности: специальность 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Суханов Сергей Иванович. – Барнаул, 2011. – 119 с.
293. А. И. Калашник, С. Н. Савченко, В. И. Панин [и др.] Методические подходы к исследованию геомеханических процессов при разработке месторождений углеводородов шельфа Баренцева моря // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2003. – Т. 6, № 1. – С. 101-108.
294. В. А. Петров, А. В. Веселовский, К. Ю. Мурашов. Моделирование геодинамических объектов в трехмерной ГИС // Геоинформатика. – 2015. – № 3. – С. 32-38.
295. Д. А. Никишин. Вариант концептуальной схемы базы геоданных с поддержкой обратимой генерализационной связанности моделей геообъектов // Системы и средства информатики. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 119-128. – DOI 10.14357/08696527210211.
296. Dogadina M. A., Botuz N. I. Rational nature management of urban flora in urban floristry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Т. 315. – №. 5. – С. 052072.
297. Buijs A., Lawrence A. Emotional conflicts in rational forestry: towards a research agenda for understanding emotions in environmental conflicts //Forest Policy and Economics. – 2013. – Т. 33. – С. 104-111.
298. И. Л. Прыгунова, В. Б. Пышкин, А. В. Калиниченко. Рациональное природопользование в процессе развития приморских территориальных рекреационных систем // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 211-214.
299. С. В. Шайтура, И. А. Байгутлина Рациональный выбор БПЛА для реализации геоинформационных сервисов мониторинга земель // Практические аспекты применения современных беспилотных летательных аппаратов. –

Бургас: Институт за хуманитарни науки, икономика и информационни технологии=Институт гуманитарных наук, экономики и информационных наук, 2022. – С. 76-87.

300. С. В. Шайтура, И. А. Байгутлина, В. Ю. Замятин, П. А. Замятин Применение беспилотных конвертопланов при реализации геоинформационных сервисов // Славянский форум. – 2022. – № 2(36). – С. 448-466.

301. М.Р. Вагизов, А.П. Потапов Технологии машинного обучения и обработки таксационных данных для визуализации геоинформационного моделирования лесных экосистем (Часть 2) // Информация и космос. – 2023. – № 1. – С. 148-156.

302. М. Л. Лапшина Математическое моделирование процесса обработки данных на основании их формализованного описания с использованием логики предикатов / М. Л. Лапшина, Т. К. Богомоллова, А. Л. Бойкова // Новое слово в науке: стратегии развития : Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Чебоксары, 22 октября 2017 года / Редколлегия: О.Н. Широков [и др.]. Том 1. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью "Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс", 2017. – С. 179-181.

303. Ю. В. Дубровская, Е. В. Козоногова, Д. С. Курушин Компьютерная визуализация задачи алгоритмизации и программирования территориального деления на основе интерактивного картографирования // Научная визуализация. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 29-46. – DOI 10.26583/sv.15.1.03.

304. Timokhin, P. Yu. Computer Modeling and Visualization of Accurate Terrain Shadows in Virtual Environment System / P. Yu. Timokhin, M. V. Mikhaylyuk // Scientific Visualization. – 2022. – Vol. 14, No. 2. – P. 77-87. – DOI 10.26583/sv.14.2.07.

305. О. А. Ульчицкий, Е. К. Булатова, Е. К. Подобреева, О. М. Веремей Метод визуализации геоинформативных данных: на примере референсных археологических объектов // – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 63-72. – DOI 10.26583/sv.14.3.05.

306. В. Н. Одинцев, Н. А. Милетенко Влияние геодинамических условий на взаимодействие техногенных геомеханических и гидрогеологических процессов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1. – С. 247-259.
307. Д. А. Никишин. Вариант концептуальной схемы базы геоданных с поддержкой обратимой генерализационной связанности моделей геообъектов // Системы и средства информатики. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 119-128. – DOI 10.14357/08696527210211.
308. С. К. Дулин, Р. Г. Дулина, Д. А. Никишин. Семиотика в структуре семантической геоинтероперабельности, необходимой для визуализации геообъектов // Системы высокой доступности. – 2015. – Т. 11, № 4. – С. 61-68.
309. А. Г. Булгакова, М. Р. Вагизов, Д. И. Елисеев, Р. Б. Борисов. Опыт применения беспилотного летательного аппарата DJI Air 2S для формирования данных геоинформационного моделирования // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2022. – № 2(42). – С. 72-77.
310. А.А. Гаврилюк, А.О. Бутусова, А.А.Кочерженко, М.Р.Вагизов. Проектирование распространения геоинформационной модели лесного пожара Информационные системы и технологии: теория и практика : сб. науч. тр. Вып. 15 / отв. ред. М. Р. Вагизов ; Минобрнауки России. ФГБОУ ВО «СПбГЛТУ им. С. М. Кирова». Кафедра информационных систем и технологий. — СанктПетербург : СПбГЛТУ, 2023. — 30-37 с.
311. Федеральный закон "О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования правового регулирования лесных отношений" от 04.02.2021 N 3-ФЗ.
312. Федеральный закон "О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и статьи 14 и 16 Федерального закона "Об общих принципах

организации местного самоуправления в Российской Федерации" от 02.07.2021 N 304-ФЗ.

313. К. Ю. Смирнов, А. В. Гемонов, А. С. Боева [и др.] К вопросу о применении квадрокоптеров для автоматической оценки лесопатологического и фитосанитарного состояния насаждений // Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы: Материалы всероссийской (с международным участием) конференции, Кологрив, 20–21 сентября 2018 года / Ответственный редактор А.В. Лебедев. – Кологрив: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный природный заповедник "Кологривский лес" имени М.Г. Сеницына", 2018. – С. 290-294.

314. К. Ю. Смирнов, А. В. Гемонов, А. В. Лебедев [и др.] Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга лесных биогеоценозов при возникновении чрезвычайных ситуаций // Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы : Материалы всероссийской (с международным участием) конференции, Кологрив, 20–21 сентября 2018 года / Ответственный редактор А.В. Лебедев. – Кологрив: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный природный заповедник "Кологривский лес" имени М. Г. Сеницына", 2018. – С. 284-289.

316. А. П. Зверев, М. В. Гомонай Использование беспилотных воздушных средств - один из способов поиска людей в лесу // Пожарная и аварийная безопасность : сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности, Иваново, 29–30 ноября 2018 года. Том Часть 1. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны,

чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2018. – С. 366-368.

317. Н. П. Васильев, М. Р. Вагизов. WebGL для наглядного представления геополей // Информационные системы и технологии: теория и практика : научно-техническая конференция Института леса и природопользования СПбГЛТУ, 25 февраля 2022 года. Том Выпуск 14. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 72-94.

318. Розенберг И.Н. Геоинформационная модель // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5-4. – С. 675-676.

319. О. А. Андреева. Геоинформационное моделирование / О. А. Андреева // Славянский форум. – 2019. – № 2(24). – С. 7-12.

320. Кожина, Л. Ю. Геоинформационное моделирование геологического строения и закономерностей размещения месторождений углеводородов в пределах Надым-Пурского междуречья (Север Западной Сибири) : специальность 25.00.01 "Общая и региональная геология", 25.00.35 "Геоинформатика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Кожина Лариса Юрьевна. – Москва, 2003. – 139 с.

321. Хазиева, Е. С. Геоинформационное моделирование изменений земельного покрова в лесостепной зоне Русской равнины на основе глобальных баз данных / Е. С. Хазиева // Геодезия и картография. – 2015. – № 10. – С. 43-49.

322. Колбовский, Е. Ю. Геоинформационное моделирование и картографирование ландшафтных местоположений / Е. Ю. Колбовский // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 5. – С. 20-24.

323. Абрамов В. М., Байков Е. А., Истомин Е. П., Кирсанов С. А., Михеев В.Л., Соколов А. Г. Стратегическое управление территориями: учебник в 2 ч. Ч. 2

Методические основы стратегического управления территориями / под общ. ред.
В. Л. Михеева. - СПб. ООО "Андреевский издательский дом", 2018. - 626 с.