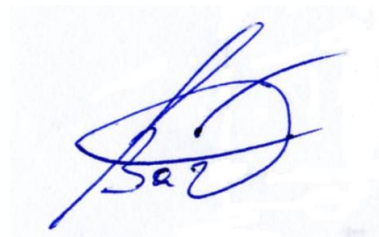


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННО БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С. М.
КИРОВА»

На правах рукописи



ВАГИЗОВ МАРСЕЛЬ РАВИЛЬЕВИЧ

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

1.6.20 – Геоинформатика, картография
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена на кафедре Информационных систем и технологий, Института леса и природопользования в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»

**Научный
консультант:**

Истомин Евгений Петрович,
доктор технических наук, профессор, директор
Института информационных систем и геотехнологий, ФГБОУ
ВО «Российский государственный гидрометеорологический
университет»

**Официальные
оппоненты:**

Черемисина Евгения Наумовна
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
системного анализа и управления,
Института системного анализа и управления, ФГБОУ ВО
«Университет «Дубна»

Матерухин Андрей Викторович
доктор технических наук, профессор, декан факультета
геоинформатики и информационной безопасности, ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет геодезии и
картографии»

Кляхин Валерий Николаевич,
доктор военных (кандидат технических) наук, профессор,
старший научный сотрудник НИИ кораблестроения и
вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

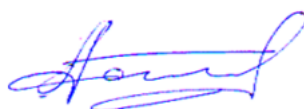
Ведущая организация: ЗАО «Институт телекоммуникаций»

Защита состоится 16 апреля 2024 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета ДС 24.2.365.01 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» и на сайте совета: <https://www.rshu.ru/university/dissertations/archive.php>

Автореферат разослан 01 февраля 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Соколов А.Г.

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 темы исследования. 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], Истомина 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], Черниковский 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 развивающихся 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.

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 отображения 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 новых признаков и метода 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.

Научная новизна.

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

2. Разработан метод и 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 геоинформационная система интеллектуального анализа данных, которая является компонентом процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем.

4. Предложена 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 и новый метод 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 лесобразующих 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, в городском озеленении и управлении городскими лесами и парками.

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 геоинформационных технологий и программно-аппаратного обеспечения.

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

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Метод построения трёхмерной геоинформационной модели лесных экосистем, который 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. 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. Модель построения интеллектуальной геоинформационной системы и технология обработки геопространственной информации анализа данных о лесных экосистемах, 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. 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.

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 лесных 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. Внедрены в отчёт по НИР в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSZU-2020-0009).

5. Внедрены в выполненную НИР по теме «Разработка технологии инвентаризации лесов основанной на данных съёмки с беспилотных 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён комплексный анализ технологий геоинформационного моделирования на основе исследования научной литературы состояния вопроса, как отечественных источников, так и зарубежных.

За основу необходимости создания новых технологий геопроостранственной визуализации сложных природных геосистем, изменяющихся в пространстве-времени и находящихся в постоянной динамике, является идея последовательного развития создания новых способов представления и визуализации разнородной геоинформации в легко воспринимаемых человеком формах в интересах управления и развития территорий.

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.

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 геопроостранственных моделей. Для этого требуется последовательная разработка комплексной технологии описывающий процесс, состав компонентов и способ создания геоинформационных моделей лесных экосистем.

Развитие геоинформационных технологий в России шло в соответствии с развитием нескольких направлений, на это 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 технологические способы применения программных продуктов (геоинформационных систем), которые были разработаны в разные периоды времени коммерческими компаниями, часть из которых используется и в современное время.

Большинство современных геоинформационных систем используются в деятельности лесного хозяйства и государственного управления лесами, на основе таких систем создаются карты лесничеств, лесные тематические планы и другие картографические материалы, отражающие характеристики лесов в определённый момент фиксации их характеристик. Однако, вполне очевидно, что с развитием новых форматов данных увеличением производительности вычислительных средств, возможным становится, оперирование и управление данными в новых способах её восприятия. К таким типам данных могут быть отнесены геопроостранственные цифровые двойники физических объектов, которые могут составить основу для формирования геоинформационных моделей лесных экосистем – нового способа, отображения, визуализации и моделирования качественного и количественного состава лесных экосистем.



Рис. 1. Спутниковая карта России 2021 года

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.

Среди зарубежных стран интенсивно ведущие лесное хозяйство в работе для анализа использования геоинформационных технологий 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.

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. В некоторых странах выстроена более гибкая система апробации и внедрения научных решений в области ведения лесного хозяйства. Особую роль имеет концептуальное определение отношения государства к использованию природных ресурсов.

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 диссертационной работе, для измерения различных свойств леса их описание достигается за счёт формирования набора геопространственных трёхмерных 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. 2).

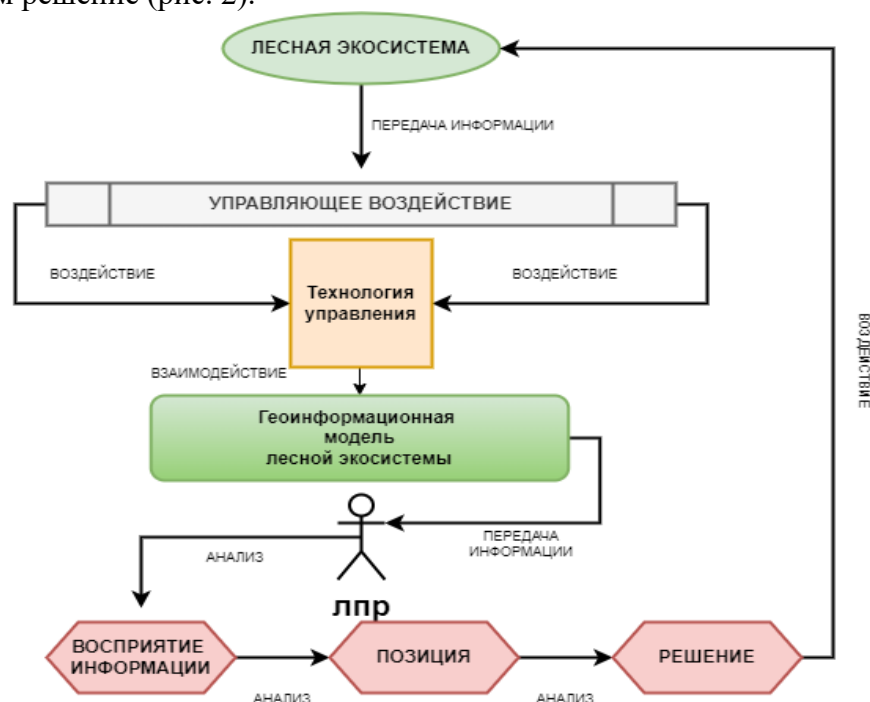


Рис. 2. Представление основных компонентов управления средствами модели.

Особенность геоинформационного моделирования состоит в том, что на основе формирования набора геопространственных данных, в удобном для восприятия информации, в виде геоинформационной модели, последующий её анализ и сформированные решения позволяют реализовать управляющее воздействие на лесные экосистемы, поскольку лесная среда подлежит различным антропогенным методам воздействия и формирования древостоев в интересах хозяйственной и исследовательской деятельности.

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, поскольку отображение такой геоинформации будет носить детальный и точный характер.

Геоинформационное моделирование лесных экосистем включает в себя, не только непосредственное использование ряда геоинформационных технологий как основного инструмента моделирования, но и разработку интерактивных 3-D моделей лесных экосистем, которое достигается за счёт следующих технологических решений, в их взаимном сочетании:

- 3-D моделирование отдельных объектов лесных экосистем;
- Применение технологий искусственного интеллекта для упрощения анализа геопространственной информации;
- Применение нейросетевых технологий для упрощения процесса построения геоинформационной модели;
- Использование данных дистанционного зондирования Земли;

- Обработка больших объёмов информации (Big-Data), средствами машинного обучения.

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.

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. 3) представлены основные компоненты задач и технологического обеспечения лесного хозяйства.

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.

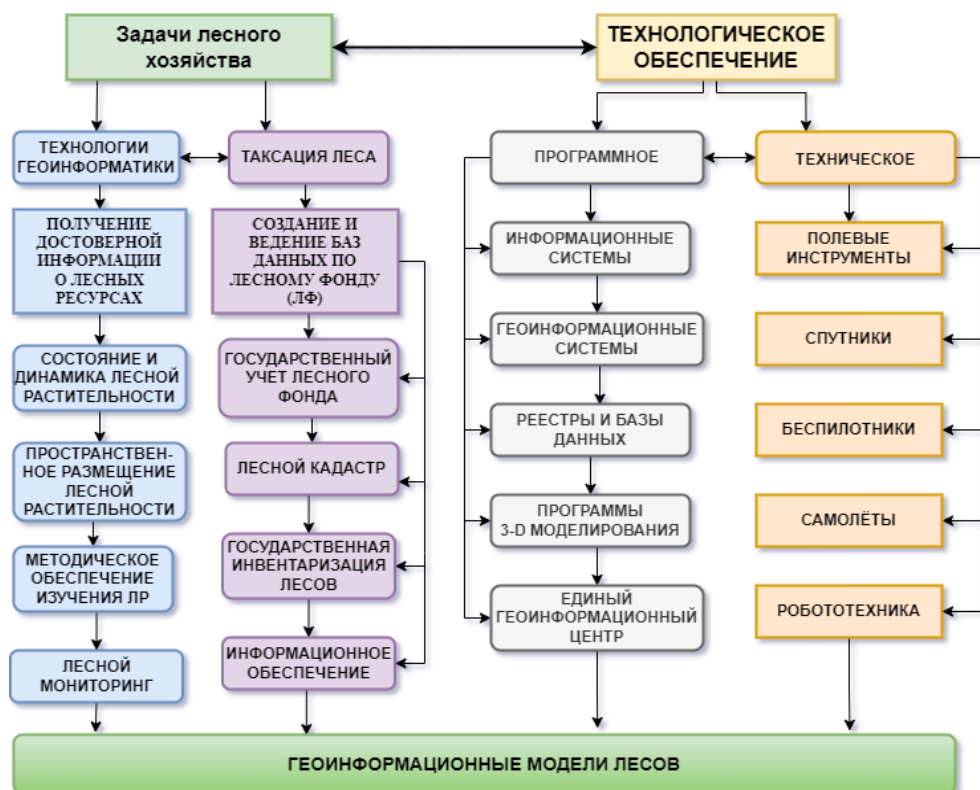


Рис. 3. Основные компоненты технологического обеспечения лесного хозяйства.

В работе определены научные проблемы геоинформационного моделирования лесных экосистем, к некоторым из них относятся:

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.

В конце 1 Главы диссертационной работы сформирована научная проблема исследования, которая указывает на не разработанность методов геоинформационного моделирования, как в России, так и за рубежом, что определяет актуальность диссертационного исследования.

В первой главе диссертационной работы проведён комплексный анализ геоинформационных технологий и обобщен 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 исследования.

Во второй главе описывается концепция геоинформационного моделирования лесных экосистем. Пространственно-временные характеристики, отражающие свойства больших по площади территорий покрытых лесами в виде геоинформационных моделей, которые имеют важное практическое значение, поскольку визуальное 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.

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 периодические данные об успешности приживаемости лесных культур в постоянной динамике.

5.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 движения лесного пожара, его поведения на основе геоинформационной модели лесной экосистемы.

6.Анализировать причины и места вспышек энтомофитовредителей, 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.

7.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 и другого техногенного характера.

8.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.

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 лесной экосистемы. Определить основные элементы

пространственных отношений управления с использованием геоинформационного моделирования можно на схеме (рис.4).

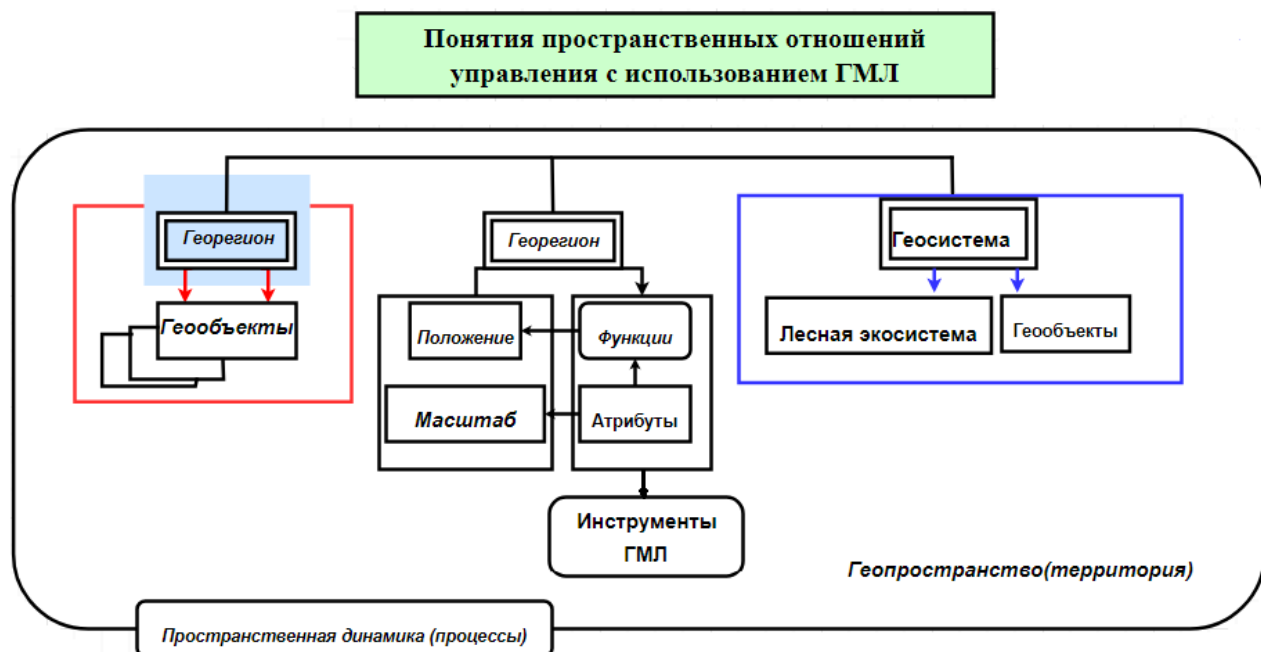


Рис. 4 Понятия пространственных отношений управления с использованием ГМЛ.

ГМЛ – Геоинформационное моделирование.

В качестве элементов содержания различных признаков лесных экосистем необходимо обобщение многомерного пространства некоторых признаков геообъектов. Необходимо определить ранжирование признаков по классификационной мере связи $d_p(z, y)$: для признаков z и y на множестве из N геообъектов.

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

Норма связи каждого признака в 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: $T2 = (\bar{x}^B - \bar{x}^A)^2 / \sigma^2(x)$,

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

Понижение размерности многомерного пространства признаков геообъектов

Факторизация признаков геообъектов в многомерном пространстве признаков:

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

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

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

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.

В качестве развития терминологического аппарата геоинформационного моделирования лесных экосистем в диссертации введены некоторые понятия и их определения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 Основные определения процесса геоинформационного моделирования лесных экосистем

Понятие	Определение
Геоинформационная модель лесной экосистемы	Трёхмерная компьютерная модель лесной территории, включающая в себя различные геообъекты 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 геообъект	Объект расположенный в пространстве имеющий привязку к конкретной территории, подлежащий процессу моделирования в среде геоинформационного моделирования.
Интерактивное геоинформационное 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 характеристики внешних и внутренних его свойств.
Среда геоинформационного моделирования	Программная среда, основной целью которой является формирование геоинформационных моделей и обладающей необходимым функционалом для создания данных типов моделей применительно к разным отраслям.

В качестве признаков характеризующих процесс геоинформационного моделирования лесных экосистем в диссертации предложены:

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.

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. Системная интеграция разнородных геоданных в единую среду моделирования 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 многофункциональнее её применение.

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. Общую структуру метода можно представить в следующем виде (рис.5).

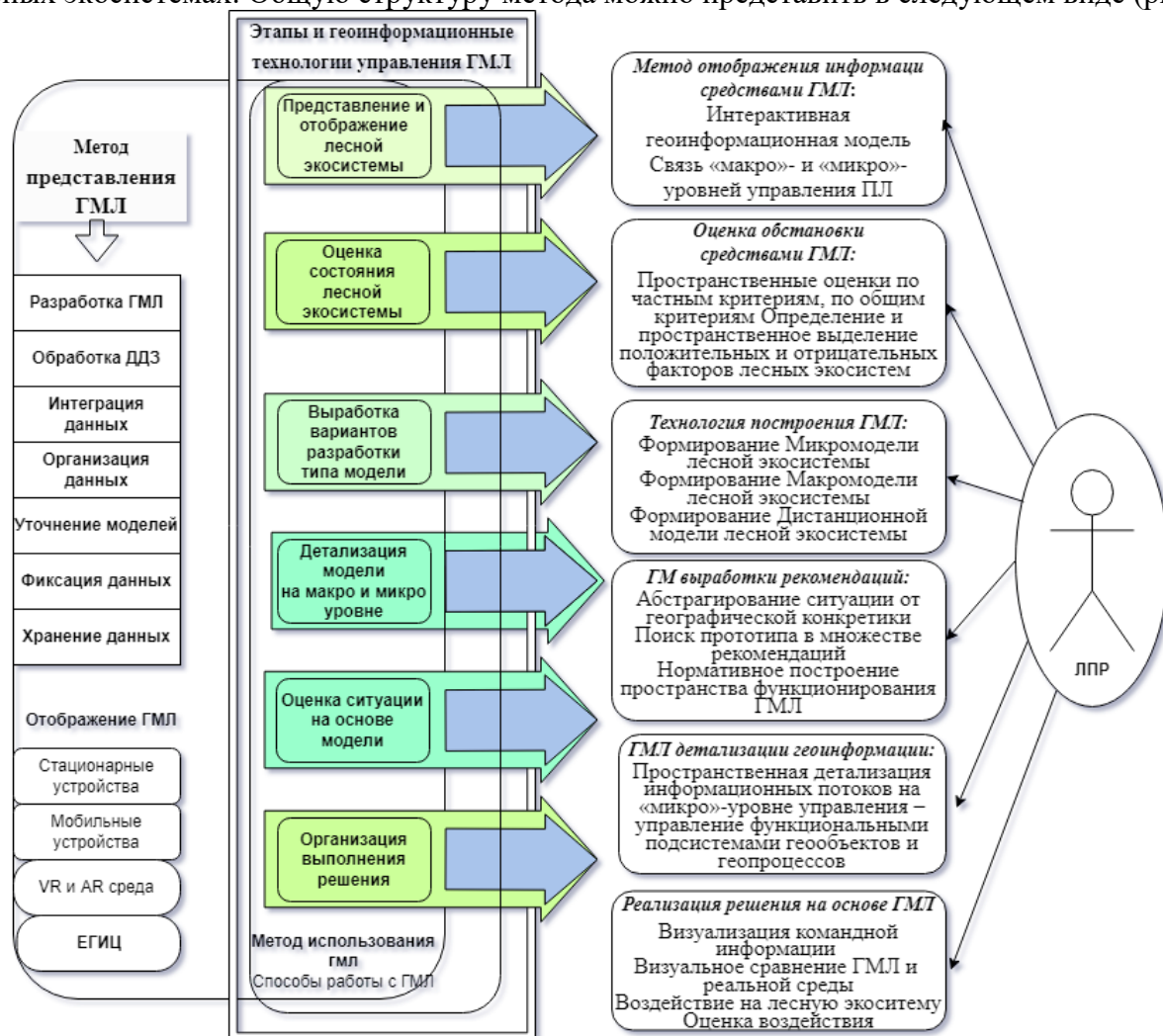


Рис.5 Основные этапы, технологии и методы отображения геоинформационного моделирования лесных экосистем.

Для выделения отдельных элементов в составе отображения геоинформационных моделей лесных экосистем обозначим два элемента подсистем требующих в свою очередь отдельного моделирования составных компонентов (табл.2), модель отдельного дерева и модель лесной территории.

Таблица 2 Основные компоненты геоинформационного моделирования

Модель дерева		Модель лесной территории	
Объект	Характеристики	Индикатор	Характеристики
вид	3-D модель	рельеф	структура рельефа
ствол	Морфология внешней структуры (модель ствола)	ПТК (Природно-территориальный комплекс)	слой с обозначенными границами в пределах рельефа
кора	модель внешней структуры (текстура)	ландшафт	ландшафтный слой 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 почвенный покров	структура компонентов в виде 3-D слоя
возраст	внешние признаки модели	геологические компоненты	дополнительные 3-D объекты части ландшафта

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):

$$GOB = (SpGO, Atrib),$$

где SpGO – собственное пространство геообъекта; Atrib - содержательные характеристики геообъекта.

$$SpGO \subset R^m, \quad SpGO = \langle DislC, Form \rangle,$$

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

Для $m = 2$ координаты центроида определяются из системы

$$d1 = ax + by;$$

$$d2 = cx + dy .$$

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.

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

1) Интегрированием объектов моделирования состоящих из гетерогенных данных в среду моделирования.

2) Точным соответствием технологии моделирования к объекту в натуре.

3) Созданием организационной структуры модели и её карты поведений.

4) Проектированием большого числа экосистемных компонентов и их организационной типизацией.

В диссертационной работе предложена следующая классификация типов 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. Представление масштабов типов геоинформационных моделей лесных экосистем можно представить на основе реального лесного квартала (рис.6)



1) дистанционная модель - $S = 100$ Га

2) макро-модель - $S = 10$ Га

3) микро-модель - $S = 0,1$ Га

Рис. 6. Масштабы геоинформационных моделей лесных экосистем

Для формирования подготовки к технологическому обеспечению и перехода к процессу разработки технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем необходимо было сформировать трёхмерные каталоги основных лесообразующих пород Северо-Запада России, для их интеграции в среду геоинформационного моделирования. В работе на основе полевых исследований были разработаны трёхмерные базы данных древесных растений. За основу были отобраны модельные деревья с I по IV класс возраста 196 квартала, в Лисинском учебно-опытном лесхозе, расположенного в Тосненском районе, Ленинградской области, филиале СПбГЛТУ имени С. М. Кирова. 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 (рис. 7,8).

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 породам 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. В качестве некоторых морфологических характеристик составляющих основу структуры базы данных использовались следующие биометрические характеристики, представленные в таблице 3, на примере Берёзы обыкновенной.

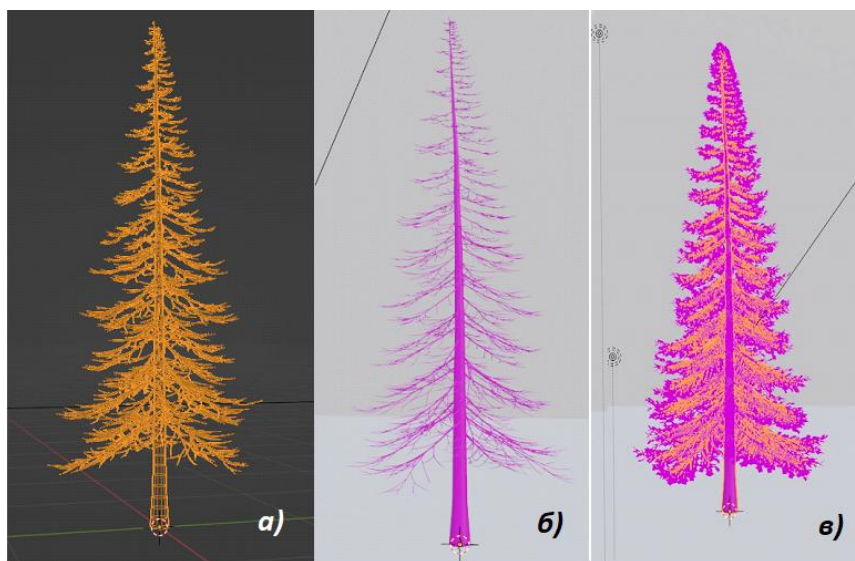


Рис. 7. Моделирование ствола и веток сосны обыкновенной IV класса возраста (60 лет): а) разметка ствола и ветвей, б) нанесение текстур, в) импорт покрытий

Таблица 3. Характеристики анализируемых биометрических данных лиственных пород деревьев

№	Показатель (класс возраста)	I	II	III
1	Высота, м	6,5	10	12,9
2	Тип кроны, м	Коническая	Раскидистая, коническая	Раскидистая, коническая
3	Диаметр кроны, м	0,6	1,5	3,5
4	Диаметр ствола на высоте (1,3 м)	7	11,5	29,5
5	Диаметр ствола у основания, см	8,5	20	33
6	Распределение листвы	Равномерное	Равномерное	Равномерное
7	Возраст, лет	10	20	30
8	Класс бонитета	1	1	1
9	Тип коры	Гладкая, у основания имеет глубокие трещины	Гладкая, легко отслаивается	Гладкая, легко отслаивается
10	Цвет коры	Белая, с черными включениями	Белая, с черными включениями	Белая, с черными включениями
11	Сомкнутость	вертикально-сомкнутые	вертикально-сомкнутые	вертикально-сомкнутые
12	Тип ветвления	У верхушечных - симподиальное, у боковых - моноподиальное	У верхушечных - симподиальное, у боковых - моноподиальное	У верхушечных - симподиальное, у боковых - моноподиальное
13	Тип листа	Черешковый	Черешковый	Черешковый
14	Характеристика листа	Простой, зубчатый	Простой, зубчатый	Простой, зубчатый
15	Форма Листа	Широкояйцевидная	Широкояйцевидная	Широкояйцевидная
16	Форма соплодия	Колосовидное	Колосовидное	Колосовидное
17	Тип плода	Цилиндрический, конический	Цилиндрический, конический	Цилиндрический, конический

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



Рис. 8. Высокополигональные 3-D модели Сосны обыкновенной I-III класса возраста

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 цифровых моделей каждого из рассматриваемых видов деревьев. В процессе полевых исследований проводилась фотофиксация отдельно хвойных, отдельно лиственных 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

Во второй главе диссертации предложена классификация типов геоинформационных моделей лесных экосистем. В качестве масштаба геоинформационного моделирования предлагается использование три типа пространственного разделения на уровни отображения геоинформации о лесных экосистемах. 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 одного и более лесного квартала или характеризующаяся крупными ландшафтно-экологическими границами лесов – дистанционная модель лесной экосистемы. Сформированные во второй главе трёхмерные модели деревьев составят основу для процесса геоинформационного моделирования лесных территорий в третьей главе диссертации.

В третьей главе сформирована комплексная технология геоинформационного моделирования лесных экосистем. 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

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.

В качестве объекта моделирования выбрано Лисинский учебно-опытный лесхоз, 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. 9).

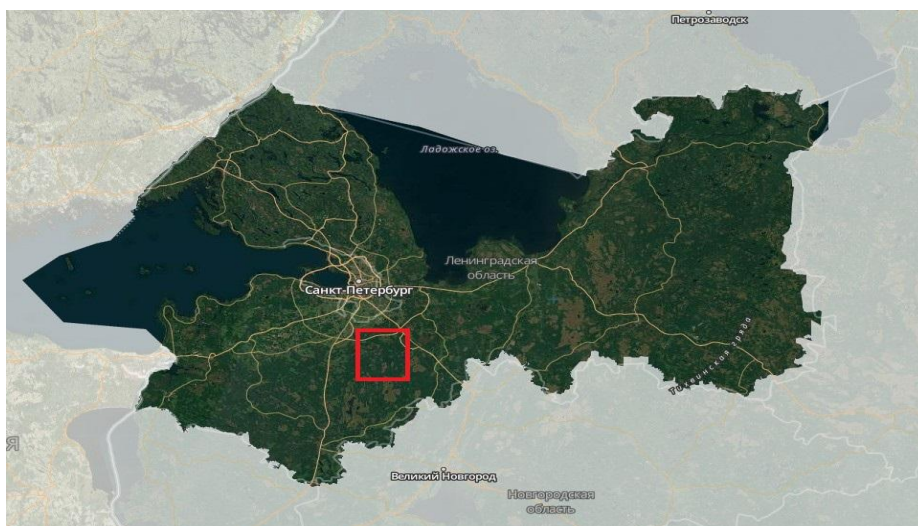


Рис. 9. Учебно-опытное лесничество, расположенное в Тосненском районе, Ленинградской области по данным web-картографического сервиса
Леса высокой продуктивной ценности.

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

- Формирование геополя рельефа на базе данных SRTM.
- Импорт данных рельефа в графическую среду для геопространственного проектирования лесов.
- Формирование подложки покрытой лесом Земли и создание карты весов.
- Фиксация точек на геополе для захвата расположения деревьев в пространстве.
- Определение породного состава лесов.
- Реализация, подготовка и наложение 3D моделей деревьев.
- Совмещение данных дистанционного зондирования и трехмерных объектов.
- Интеграция таксационных данных в модель.
- Использование модели.

Общая концепция технологии геоинформационного моделирования представлена на схеме (рис.10), 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 об устройствах и программах используемых для достижения поставленной задачи – формирования геоинформационных моделей лесных экосистем.

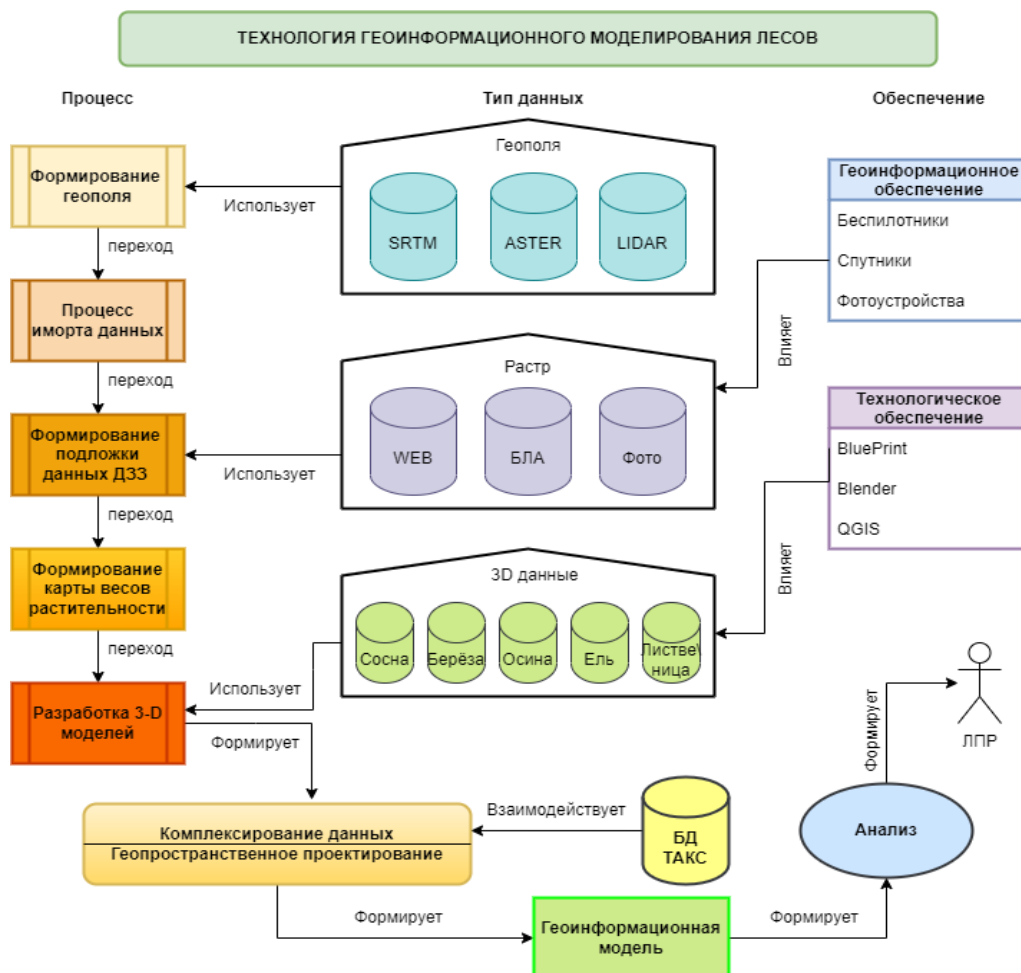


Рис. 10. Общая схема технологии геоинформационного моделирования

В качестве данных геопространственного обеспечения определены следующие источники получения информации:

1. Данные дистанционного зондирования Земли на основе спутниковых снимков Google Earth Pro и материалов полученных с беспилотника;
2. Программное обеспечение для построения полётного задания с использованием беспилотного летательного аппарата Litchi;
3. Программное обеспечение для формирования трёхмерных моделей лесных экосистем разного масштаба, среда моделирования Blender и подключаемый к ней модуль расширения 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. 11). 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.

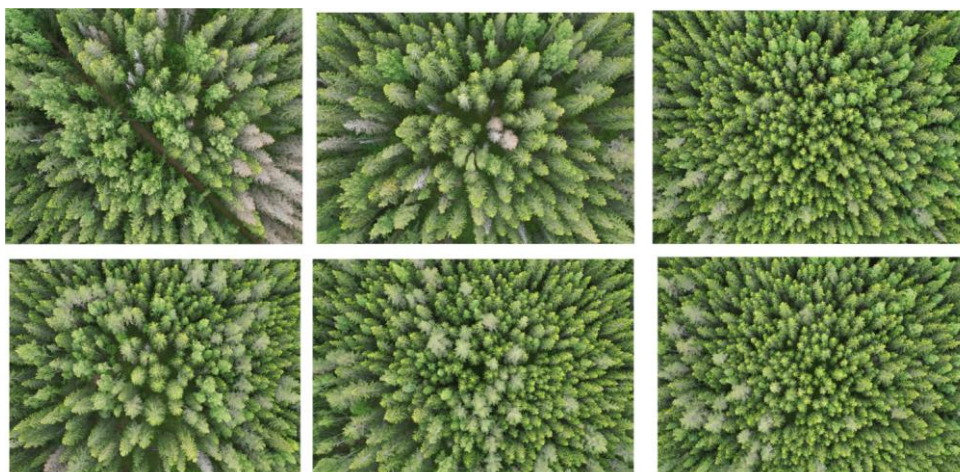


Рис. 11. Серия снимков полученных с БЛА DJI Air 2S

Необходимость проведения съёмки обоснована получением более детальной 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, данные материалы превосходят по качеству открытые спутниковые материалы, размещённые в свободном доступе.

Однако в процессе получения информации средствами БЛА существует сложность процесса формирования гладких программных траекторий. Обусловлено это тем, что при съёмке лесных массивов БЛА различными устройствами, без систем стабилизации, 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.

В виду кривизны 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 $\overrightarrow{a_1b_1}$ совпадал с положительной частью горизонтальной оси. Эти достаточно простые, чисто геометрические преобразования, иллюстрируют графики, представленные на рис. 12. Ось ординат соответствует направлению на север, ось абсцисс - на восток, а масштаб осей представлен в метрах.

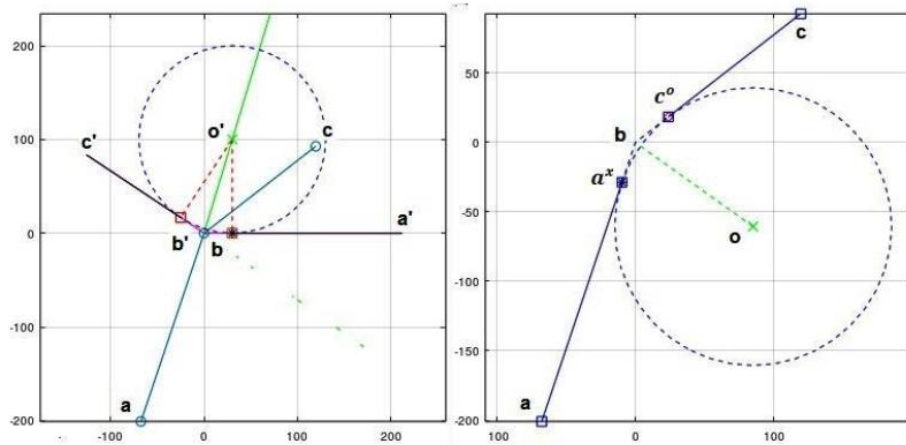


Рис. 12. Прямое и обратное преобразование координат при поиске точек сопряжения.

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 $\overrightarrow{a_1 b_1}$ и $\overrightarrow{b_1 c_1}$ будут точки:

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

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

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

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

Это позволяет при обратном переходе из прямоугольной системы координат в геодезическую систему координат точки сопряжения определять как точки на ортодромиях $\overrightarrow{a_1 b_1}$ и $\overrightarrow{b_1 c_1}$, 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 БЛА с учетом ограничений на его динамические характеристики.

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

Процесс построения модели геополя будет реализован посредством использования 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 крупной ландшафтной структуры рельефа, на которой могут произрастать лесные массивы.

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:

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

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 δ_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:

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

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. Итогом формирования основы для геоинформационного моделирования является сформированное геополе (рис.13).

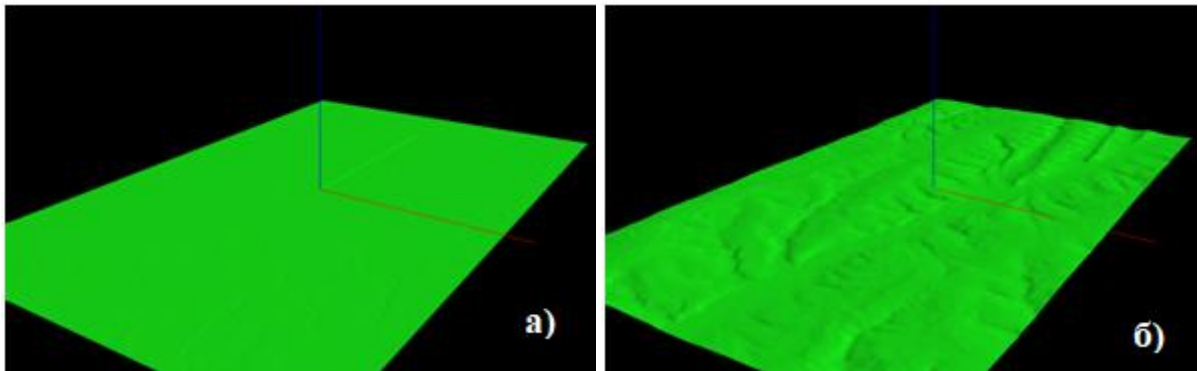


Рис. 13. Модели геополей полученные при помощи технологии WebGL: а) 196 квартала (Лисинское учебно-опытное лесничество), б) геополе с характерным отображением рельефа (Бугульминско-Белебеевской возвышенности).

Следует отметить, что данные SRTM поставляются участками размером 5 градусов по широте и долготы (5x5-tile). Таким образом, всё пространство по долготы (от -180 до +180) разбито на 72 участка (360/5). На основе проведённого построения геополя (рис.13а), в 196 квартале данного масштаба его морфометрические искажения отсутствует, относительно ровное плато, в отличие от к примеру, аналогично построенной модели Белебеевского лесничества (рис.13б), где чётко определяются структурные изменения поверхности рельефа в зависимости от перепадов высот в его морфометрии, что говорит о работоспособности использования технологии WebGL в задаче формирования геополей. Однако такое формирование целесообразно применять при формировании моделей лесных экосистем в горных районах.

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, на сформированное геополе из предыдущего этапа наносится развёртка подготовленных данных дистанционного зондирования Земли, это могут быть как снимки, полученные с БЛА, так и импортированные изображения спутниковой основы открытых web-картографических материалов (рис.14).

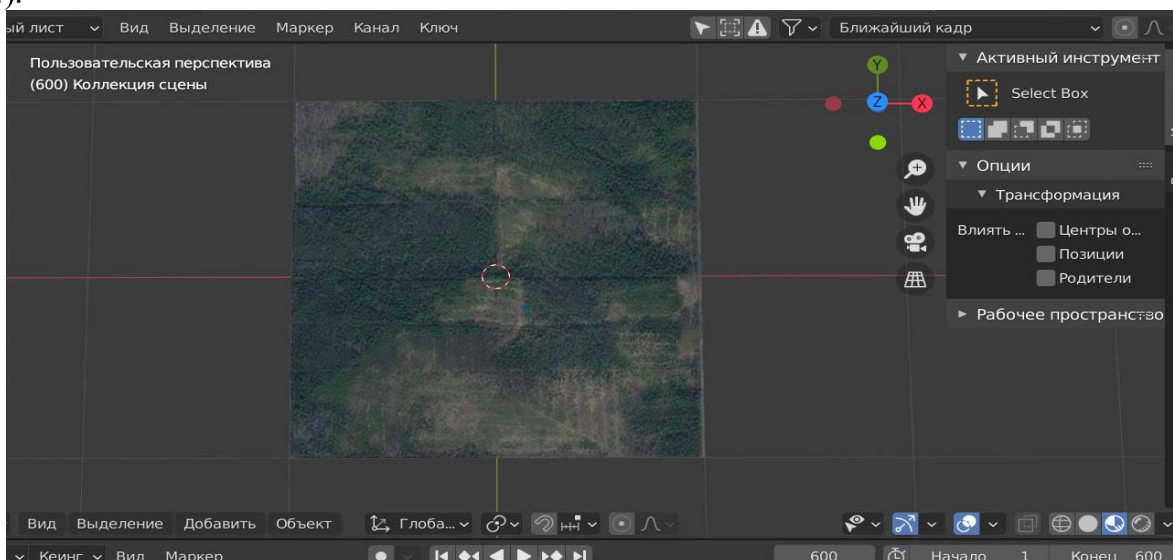


Рис. 14. Скриншот импорта подготовленной подложки в среду моделирования

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.

Импортированная предобработанная подложка позволяет точно установить границы для проектирования тепловой карты (рис. 14). 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 как низкополигональные, так и высокополигональные трёхмерные модели деревьев спроектированные (из заготовленной базы моделей деревьев).

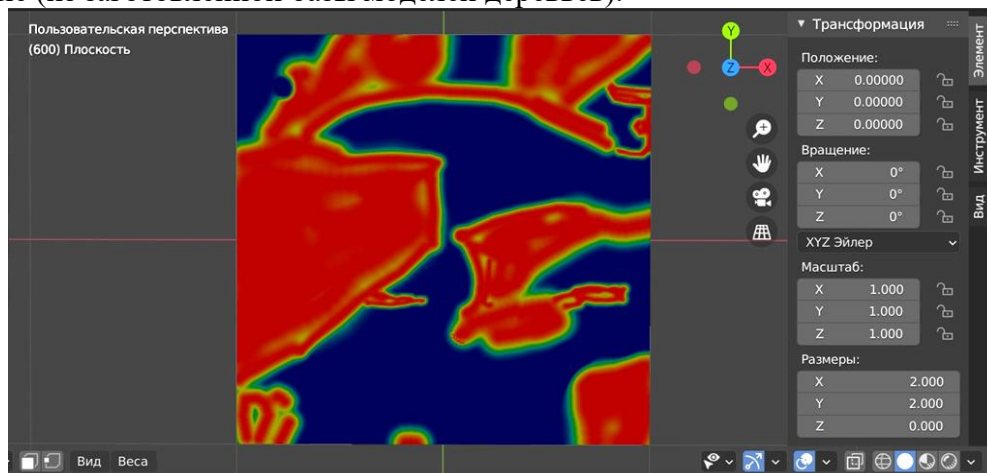


Рис. 14. Снимок построенной тепловой карты по распределению весов и границ покрытой лесом растительностью

После процесса построения тепловой карты и наложения группы точек системой частиц, отключив подложку тепловой карты, получим отображение всех точек оснований центров крон деревьев, с обратной стороны геополя, у данных точек будут координаты в местной системе координат, что позволит отцентровать 3-d модели, согласно спутниковой подложке, перед размещением растительности в моделируемом геопространстве.

В диссертационной работе подробно описывается процесс интеграции трёхмерных моделей, на подготовленную обложку для этого реализованы следующие задачи:

1. Сформирован алгоритм определения центра крон деревьев для их точечного расположения согласно данным дистанционного зондирования Земли.

2. Произведён расчёт количества насаждений в 196 квартале в полуавтоматизированном режиме для определения точного количества формирования низкополигональных трёхмерных моделей деревьев.

3. Разработана процедура совмещения заготовленной базы трёхмерных моделей на подложку при помощи формирования связи родитель – точка, через функцию присвоения идентификатора для каждой модели дерева.

Созданная, итоговая дистанционная модель 196 квартала учебного опытного лесничества, после размещения трёхмерных деревьев, при этом данные дистанционного зондирования отображаются при включении подложки (рис. 16).

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. 17).

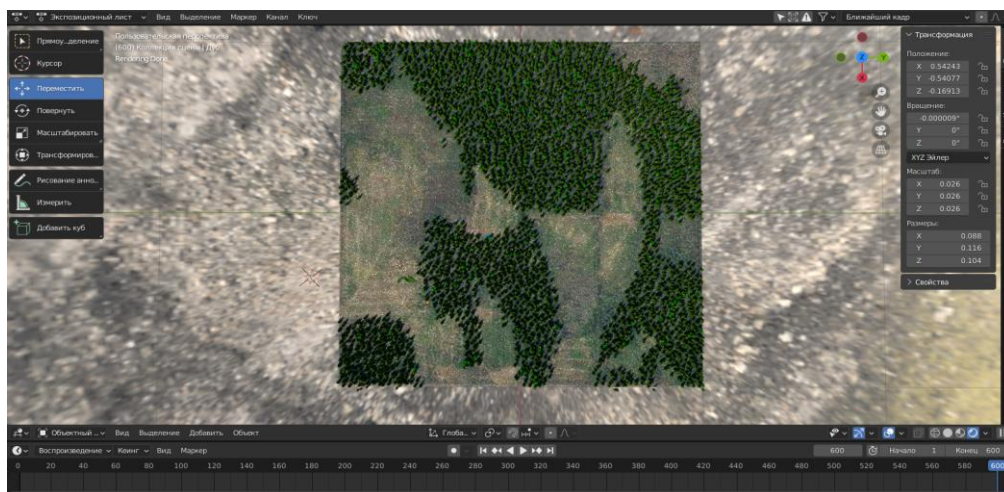


Рис. 16. Итоговый вид модели с интеграцией трехмерных данных

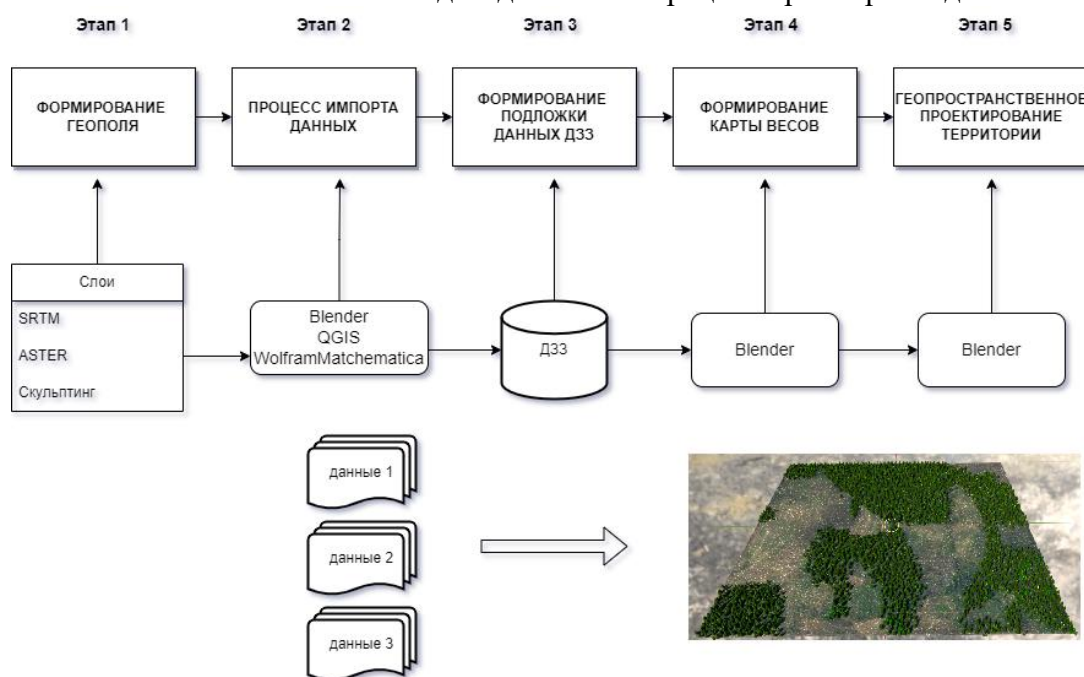


Рис. 17. Схема алгоритма цифровой трансформации модели на основе полевых данных

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.

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.

Уровень представления макромоделей лесной экосистемы удобен для работы с арендованными лесами, где требуется просмотр отдельных таксационных выделов, или выделенного фрагмента участка леса (рис. 18). Для формирования макро-модели, более удобным инструментом в её реализации являются графические движки, используемые в работе с профессиональной трёхмерной графикой.

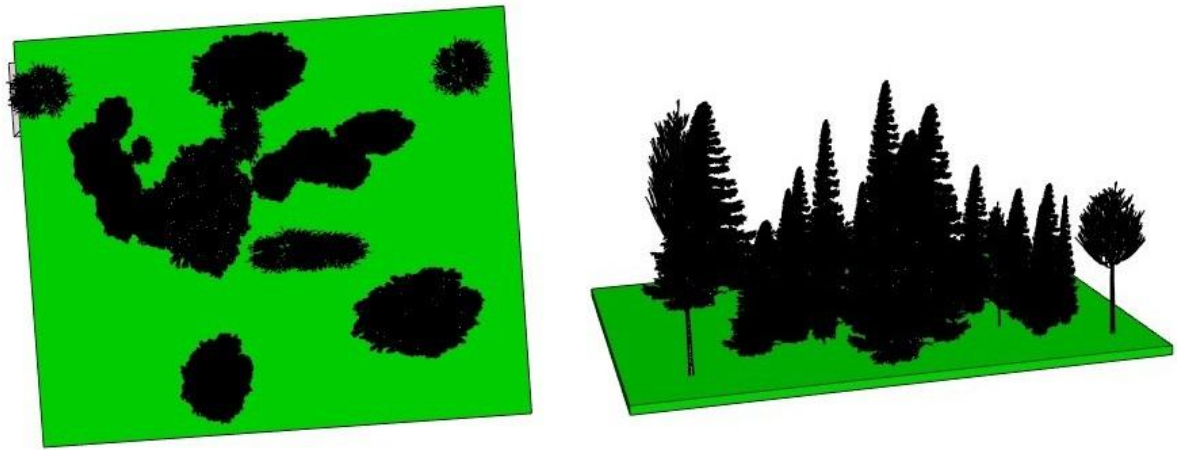


Рис. 18. Выделенные фрагменты лесной экосистемы.

В основных этапах и технологии последовательности формирования макро-моделей лесной экосистемы, 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. 19).

Выделить основные компоненты, задача которых отображение и предоставление информации на уровне макро модели лесной экосистемы возможно на базе декомпозиции моделей на группы, представленные наиболее полно в таблице 12 и подразделяются на:

- Модели верхнего уровня.
- Модели среднего уровня.
- Модели низшего уровня.
- Модели внутренних компонентов.

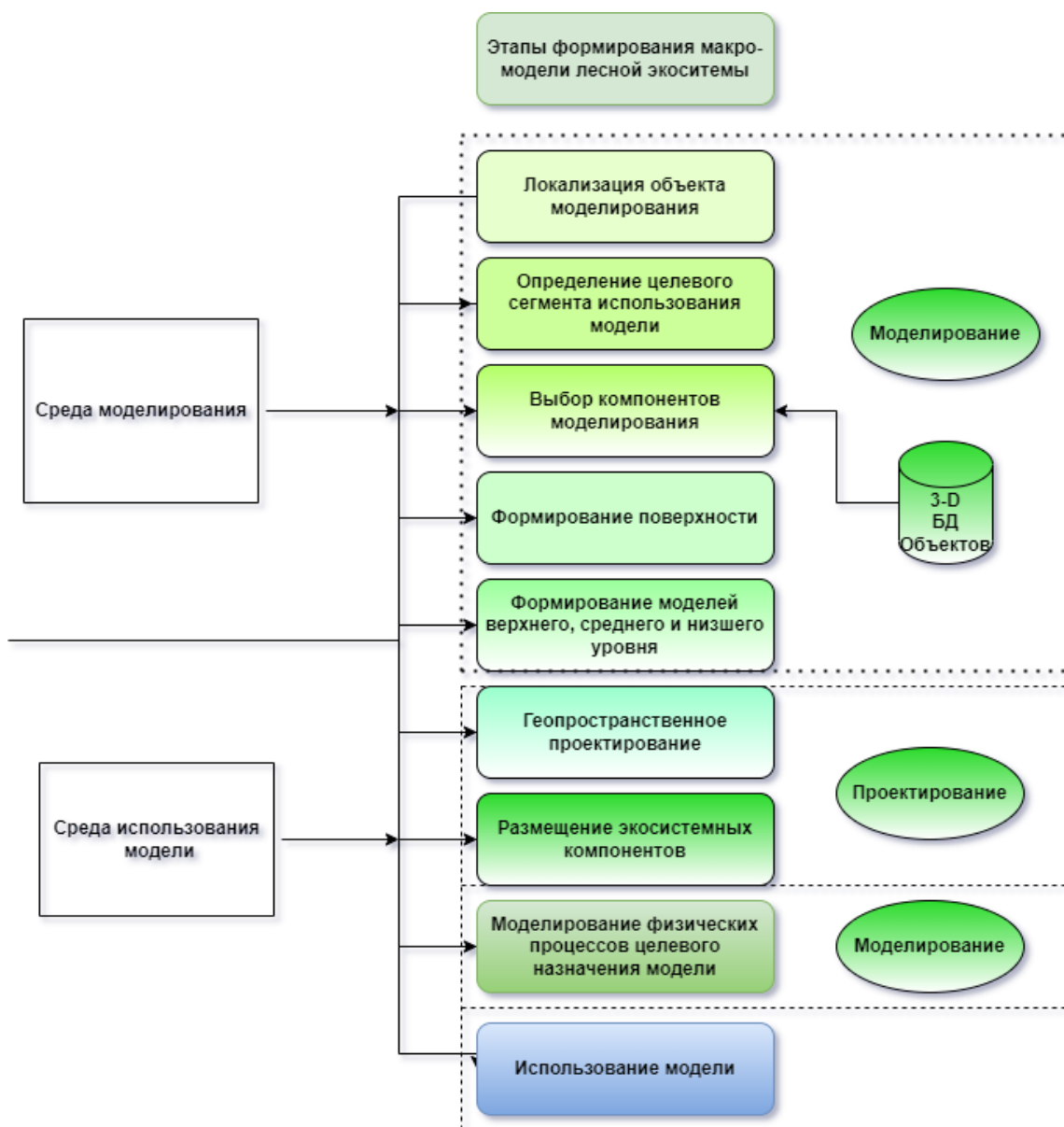


Рис. 19. Этапы разработки макромоделей лесной экосистемы

Таблица 12 Классификация 3-d моделей, компонентов лесных экосистем

Модели верхнего уровня			
Элемент	Тип модели	Формат модели	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	Площадной объект	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

Процесс отображения макромодели заключается в выборе локализованного участка леса и его масштабировании. При этом, процесс цифровой трансформации геобъектов можно представить в следующем виде (рис.20).

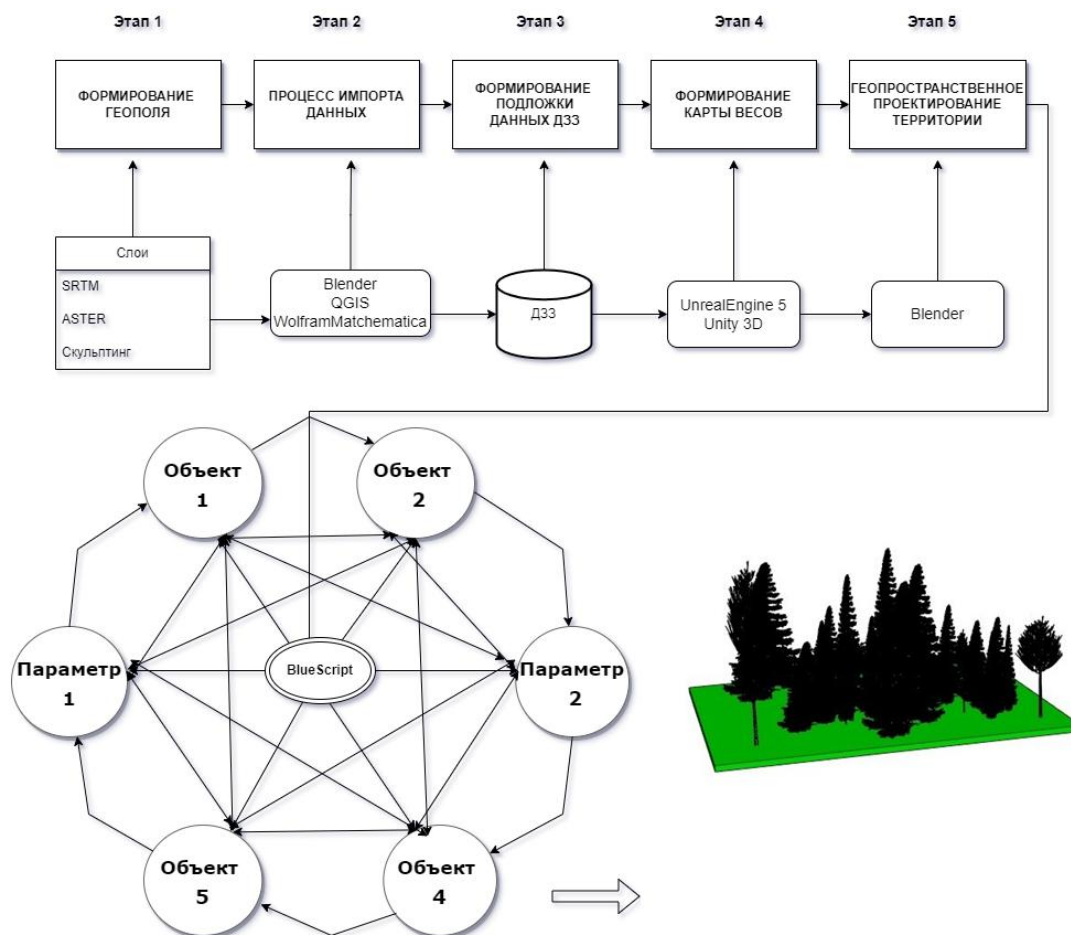


Рис. 20. Схема алгоритмов формирования и компоненты цифровой трансформации преобразования данных в макро-модель лесной экосистемы.

Обобщая результат формирования макро-модели лесной экосистемы в среде геоинформационного моделирования, представлены (рис. 20) основные компоненты и этапы технологии цифровой трансформации объектов лесных экосистем и вспомогательных компонент в виде структурно-логической схемы.

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.

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 прodelывать с моделируемыми объектами (рис. 21).

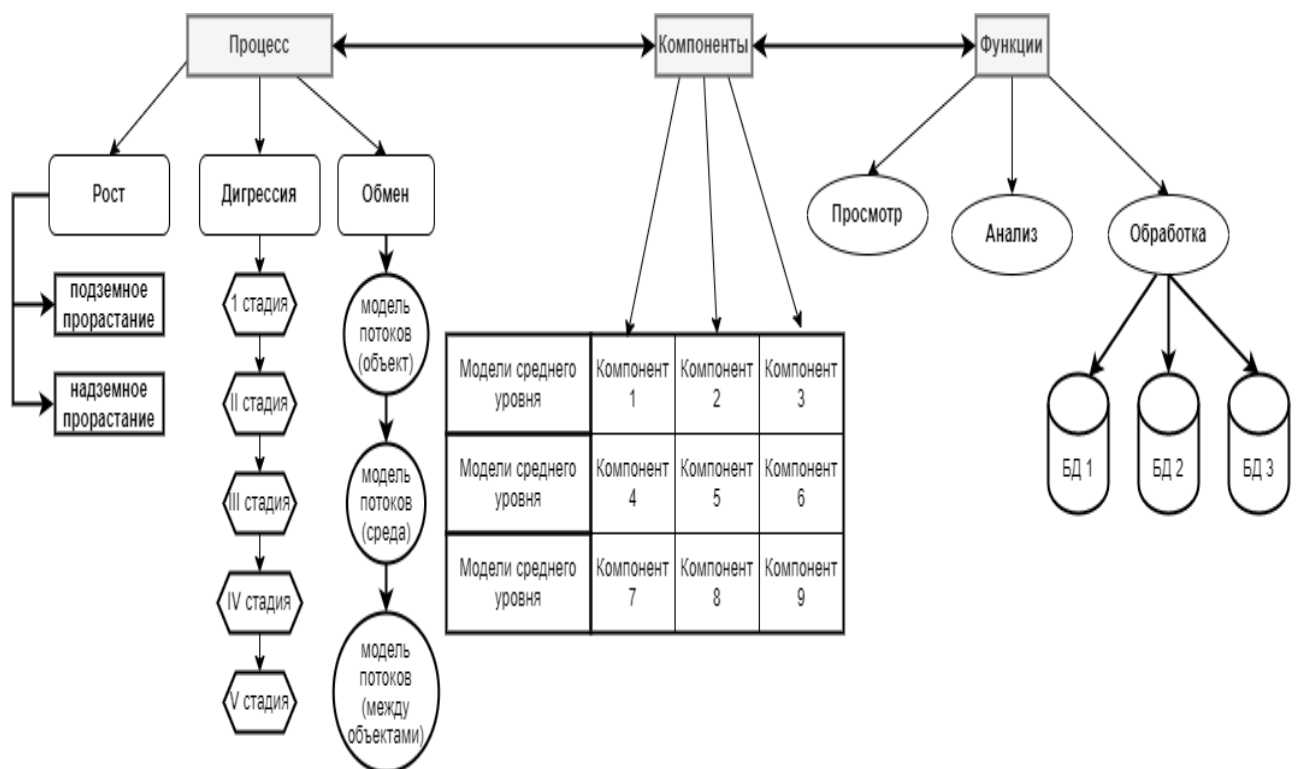


Рис.21. Блок схема процесса составляющие процесса геоинформационного моделирования микромоделей лесной экосистемы

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 их жизненном цикле в процессе геоинформационного моделирования;
- лесопатологические характеристики и их моделирование;
- структурные и морфологические особенности отдельных деревьев;
- почвенные характеристики;
- микологические характеристики.

Микромоделей 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 микромоделей 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.

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.

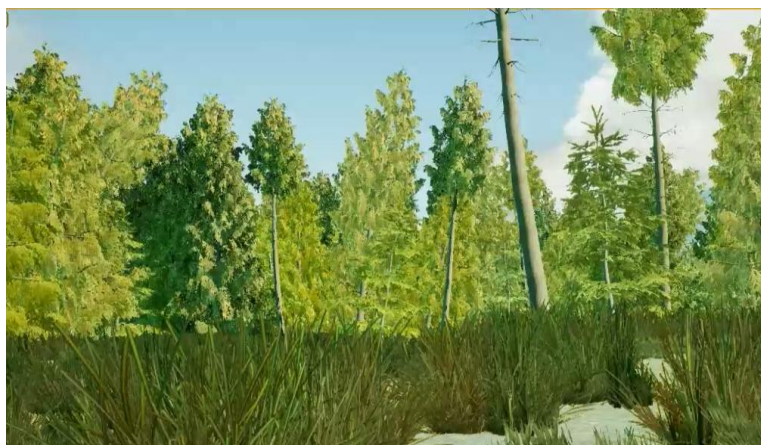


Рис. 22. Геоинформационная модель 196 квартала учебно-опытного лесничества

При этом, сложность геоинформационной модели лесной экосистемы определяется как совокупность моделируемых параметров - $K_{ГМЛ}$

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

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

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

$S_{пл}$ - площадь моделируемой территории

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

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

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

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

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 подстилаяющая поверхность леса, состоящей из многообразных живых и неживых компонентов, расположенных в геопространстве (рис. 23).

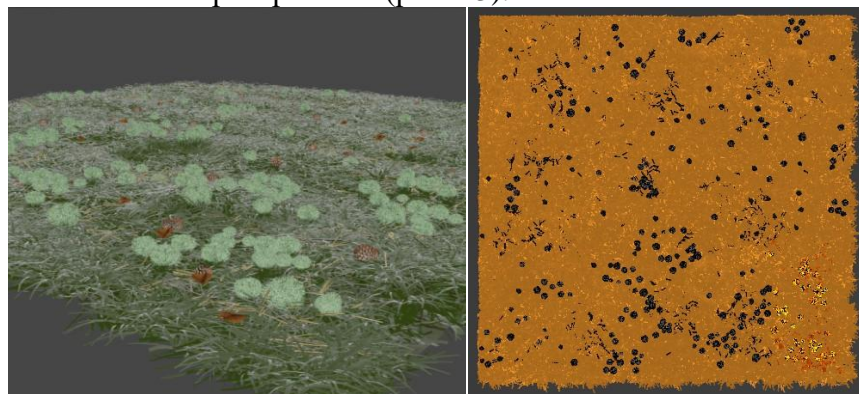


Рис. 23. Снимок микромодели лесной экосистемы

Примечательно, что процесс микромоделирования в целом, адаптируем не только для естественных растительных сообществ, но при помощи аналогичного процесса моделирования и использования предлагаемой 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.

Однако, в процессе исследования установлено, что длинный технологический цикл по формированию любых геоинформационных моделей как естественных так и искусственных насаждений и других компонентов, формирует проблему использования целой цепочки разнообразного программного обеспечения включая как системы трёхмерного моделирования, так и геоинформационные системы и математические программные пакеты, что выставляет к исполнителю, разработчику такой модели повышенные требования к необходимому освоению функционала нескольких программных систем.

Решением такой проблемы в диссертационном исследовании будет принято решение о формировании целостной интеллектуальной геоинформационной системы, в которой объединены в единую среду как процессы, связанные с геоинформационным моделированием, так и процессы, связанные с отображением, координированием и управлением на основе разработанных моделей территории различных типов данных.

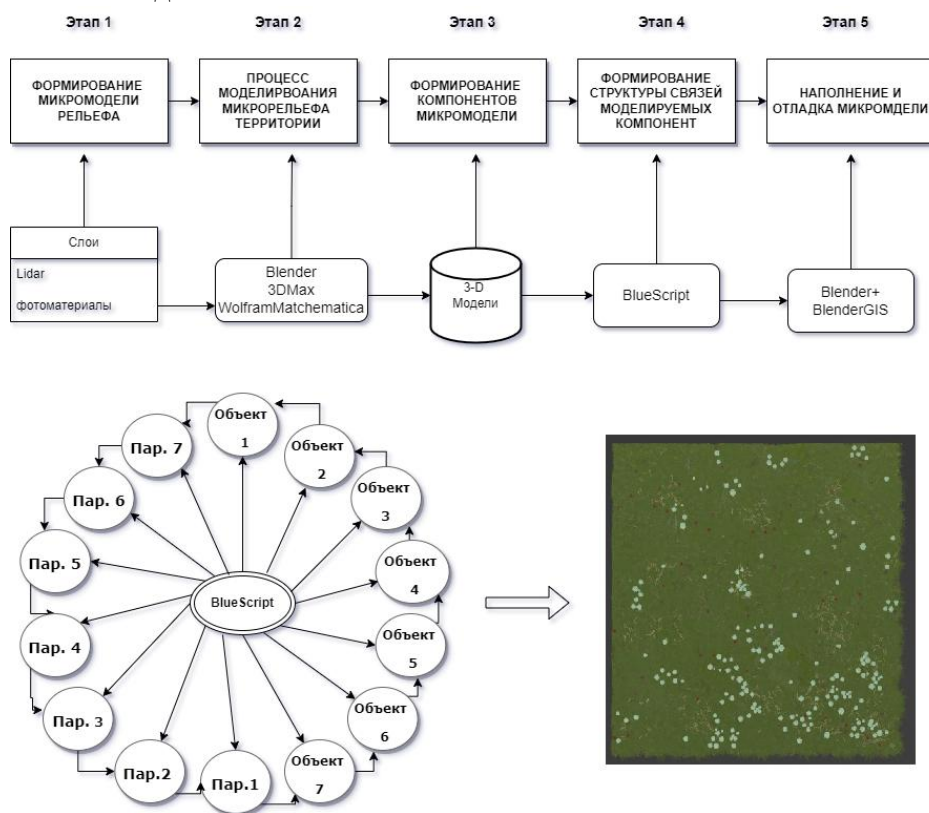


Рис. 24. Схема алгоритма формирования и компоненты цифровой трансформации преобразования данных в микромодель лесной экосистемы.

В основе алгоритма цифрового преобразования (рис.24) 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 и заданными параметрами, для этого используется языки визуального скриптинга.

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 анализа интервальных отношений в лесной экосистеме. Где по заданному алгоритму, возможно, следить в режиме реального времени за переходом на этапах жизненного цикла растений из одного класса в другой.

В третьей главе произведено описание необходимого геоинформационного и технологического обеспечения, полного цикла процесса моделирования лесной экосистемы, при формировании ряда геопространственных данных для разработки всех типов геоинформационных моделей лесных экосистем.

На основании разработанного метода произведено комплексное формирование всех трёх типов предложенных в работе геоинформационных моделей лесных экосистем: дистанционная модель лесной экосистемы, макро модель лесной экосистемы, микро модель лесной экосистемы.

В четвёртой главе 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 обрабатываемых сведений, у пользователя отсутствует потребность в использовании нескольких программных систем, такой единой интегрированной средой может выступить специальная 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 их анализом;
- прогнозированием изменений свойств данных объектов;
- 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.

Интеллектуальную геоинформационную систему можно представить как совокупность подсистем, образующих основное ядро системы (рис. 25). Реализованная программа прошла государственную регистрацию в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Программа ориентирована на обработку картографической информации и анализа состояния земель лесного фонда. Имеется модуль интеллектуальной обработки геопространственной информации, пользовательский интерфейс, многооконный режим работы, наличие поля «инфограмм» и интеграция геоданных в web-среду. Предназначение программы: использование и интеграция трёхмерных данных в виде геоинформационных моделей территорий с возможностью отображения насаждений на карте. Реализовано предоставление многооконного доступа к выбранной для анализа территории. Программа предназначена для лиц, принимающих решения в области управления лесного хозяйства, экологии и природопользования. Функционал содержит возможность обмена картографической информацией и персональных карт.

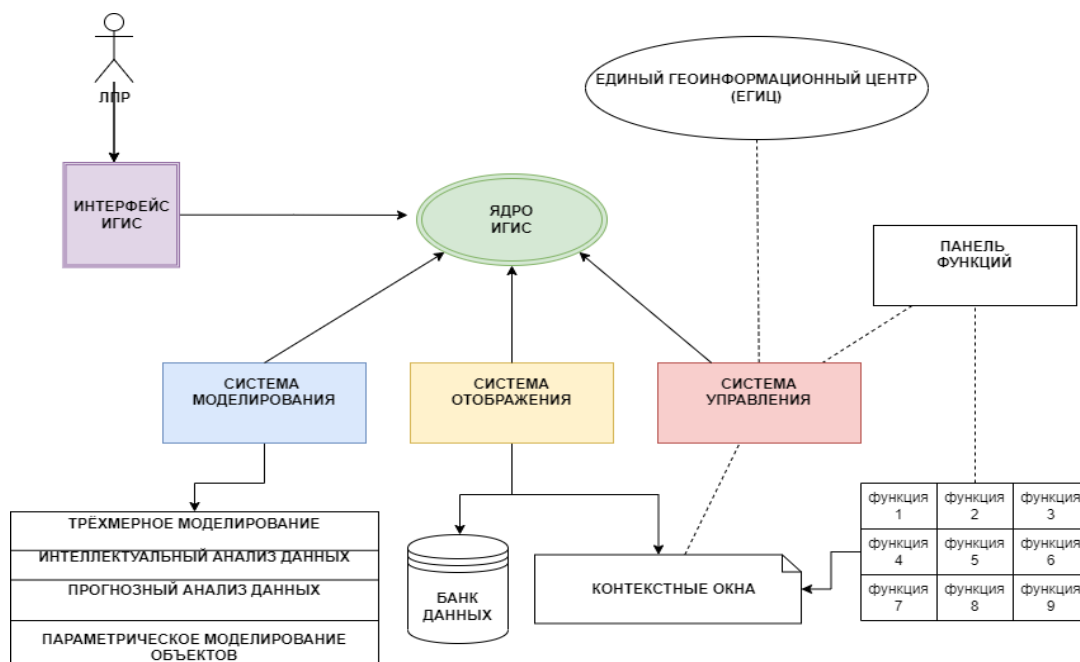


Рис. 25. Основные компоненты в составе интеллектуальной геоинформационной системы
Интеллектуальная геоинформационная система состоит из:

- подсистемы управления
- подсистемы моделирования
- подсистемы отображения

Её отличительными особенностями от стандартных геоинформационных систем являются такие технологические особенности: наличие возможностей интеграции трёхмерных данных в среду моделирования, наличие возможности обработки геоинформации средствами машинного обучения, прогнозный анализ состояния объектов и интерактивный интерфейс (рис.26).



Рис. 26. Поле отображения геоинформационной модели лесного квартала

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 интерфейсов и функций геоинформационных систем. Для развития геоинформационных систем в своей структуре они должны содержать не только стандартизированное отображение

данных с их точной позицией, но и отображение предполагаемых изменений на базе сочетания технологий машинного обучения с трёхмерным объектом.

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 в режиме реального времени;
- параметрический анализ данных, установление одного параметра для анализа степени его влияния на другие.

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. 27).



Рис. 27. Пример отображения моделей крон слева и информации о насаждениях справа, в одном поле интеллектуальной ГИС или ИГИС.

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. Некоторые элементы отображения особых и стандартных функций в ИГИС представлены в таблице 4.

Таблица 4 Основные стандартные и особые функции, 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 слои	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 4 главе в результате сформированы основные требования к реализуемой интеллектуальной геоинформационной системе и основные задачи, решаемые при помощи предлагаемой ИГИС 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.

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.

В пятой главе предложена концепция Единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством.

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

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 данных 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. 28).

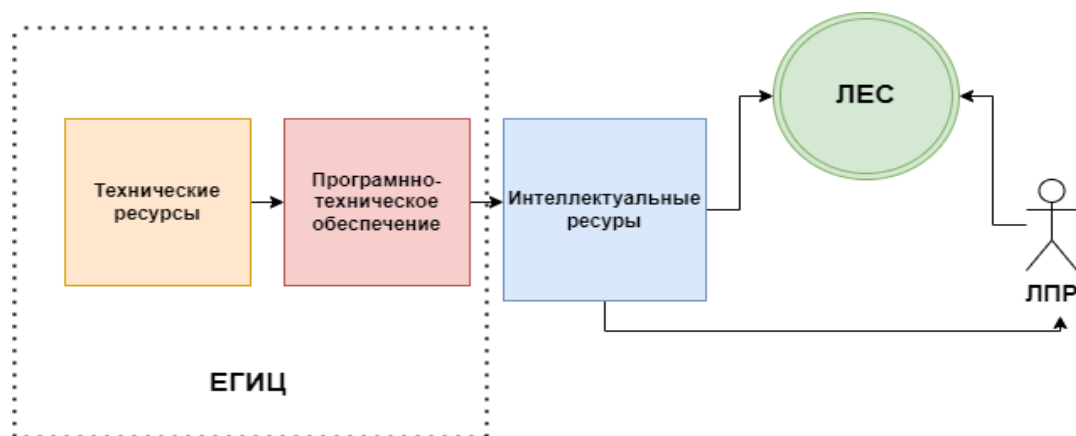


Рис. 28. Структура ЕГИЦ

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.

В качестве организационно-правовой формы предлагается федеральное государственное учреждение, учредителем которого может выступить Министерство цифрового развития России. Таким образом, подготавливать цифровые данные возможно на базе одного учреждения, после чего передавать к ним доступ в лесные и природоохранные учреждения. В структуре данных фиксирующихся в деятельности центра необходимо использование технологии блокчейн описанных, что влечёт за собой три положительных момента:

- исключается возможность искажения цифровых данных;
- снижается вероятность неправомерного использования полномочий по управления данными в корыстных целях;
- формируется банк цифровой информации о лесных экосистемах на каждый субъект РФ.

Предпосылками к созданию центра является: необходимость реструктуризации деятельности систематического обновления информации о лесном фонде, появление новых геопространственных форматов данных, возможность накопления фотоизображений за разные временные периоды полученных аэрокосмическими средствами, возможность создания геоинформационных моделей лесных экосистем..

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. Реализация единого геоинформационного центра позволит обеспечить централизованное агрегирование геопространственной информации, проводить её всесторонний анализ и геоинформационное моделирование лесных экосистем, распределять полученную информацию для необходимости различным ведомствам, чьи решения обеспечивают региональное развитие лесного хозяйства на основе целевого использования природных ресурсов и устойчивого развития лесного хозяйства России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования изучены и проанализированы современные технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем. Изучен мировой и отечественный 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 решена поставленная научная проблема исследования.

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 новый 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 лесной территории и целевого назначения модели. Для подготовки к процессу реализации технологии геоинформационного моделирования разработаны высокополигональные 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 типов геоинформационных моделей лесных экосистем: дистанционной, макромоделли, микромоделли 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 лесхоза. 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 об объектах моделирования. При помощи высокопроизводительного серверного оборудования аналогичным образом реализованы остальные типы геоинформационных моделей, макромоделли 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, обеспечением его многомерными данными, отдельно в работе 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации из перечня научных журналов рекомендованных ВАК РФ

1. Вагизов М. Р. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 1) // Геоинформатика. – 2021. – № 4. – С. 43-49. – DOI 10.47148/1609-364X-2021-4-43-49.
2. Вагизов М. Р. Истомин Е.П. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 2) // Геоинформатика. – 2022. – № 1. – С. 40-46. – DOI 10.47148/1609-364X-2022-1-40-46.
3. Вагизов М. Р. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 3) // Геоинформатика. – 2022. – № 2. – С. 34-41. – DOI 10.47148/1609-364X-2022-2-34-41.
4. Вагизов М. Р. Разработка базы данных трехмерных моделей хвойных лесобразующих пород Сосны и Ели обыкновенной для геоинформационной модели лесной экосистемы // Информатика и космос. – 2022. – № 2. – С. 162-167.
5. М. Р. Вагизов, М. М. Шишкин, Е. П. Истомин [и др.] Разработка базы данных трёхмерных моделей лиственных лесобразующих пород Берёзы и Осины для геоинформационной модели лесной экосистемы // Геоинформатика. – 2022. – № 3. – С. 39-46. – DOI 10.47148/1609-364X-2022-3-39-46.
6. 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.
7. Потапов А. П., Вагизов М.Р. Технологии машинного обучения и обработки таксационных данных для визуализации геоинформационного моделирования лесных экосистем (Часть 1) // Информатика и космос. – 2022. – № 3. – С. 125-129.
8. Вагизов М. Р., Потапов А.П. Технологии машинного обучения и обработки таксационных данных для визуализации геоинформационного моделирования лесных экосистем (Часть 2) // Информатика и космос. – 2023. – № 1. – С. 148-156.
9. 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.
10. М. Р. Вагизов, К. А. Витлев, А. Г. Соколов [и др.] Методика применения программного продукта Wolfram Mathematica для геоинформационного моделирования лесных экосистем // Геоинформатика. – 2023. – № 2. – С. 49-56. – DOI 10.47148/1609-364X-2023-2-49-56.
11. М. Р. Вагизов, С. П. Хабаров. Расчет траектории движения БПЛА с учетом требования снижения его скорости в конечной точке // Информатика и космос. – 2022. – № 1. – С. 122-128.
12. М. Р. Вагизов, С. П. Хабаров. Алгоритм формирования гладких программных траекторий движения БПЛА // Информатика и космос. – 2021. – № 2. – С. 122-130.
13. М. Р. Вагизов, А. М. Заяц. Концепция инфраструктуры единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством (часть 1) // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27, № 3. – С. 50-61. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-50-61.

14. М. Р. Вагизов, А. М. Заяц. Аппаратно-программная реализация инфраструктуры единого геоинформационного центра лесного хозяйства // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 92-105. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-92-105.
15. М. Р. Вагизов, С. Ю. Степанов, Я. А. Петров, А. Ю. Сидоренко. Методика дешифрирования и инвентаризации лесных насаждений средствами ГИС AutoCad Map // Геоинформатика. – 2020. – № 4. – С. 20-27.
16. М. Р. Вагизов. Единый геоинформационный центр управления лесным хозяйством // Информация и космос. – 2023. – № 4. – С. 116-120.
17. М. Р. Вагизов, Т.В. Двдцатова, И.А. Мельничук. Геоинформационное моделирование городских газонов // Геоинформатика. – 2023. – № 4. — С. 29–38. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-29-38>.
18. М. Р. Вагизов. Геоинформационное моделирование микромоделей лесной экосистемы // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2023. – Т. 28, № 6. [в печати]

Публикации в международных базах цитирования Web of Science и SCOPUS

19. M. R. Vagizov, E. P. Istomin, V. L. Miheev [et al.] Visual digital forest model based on a remote sensing data and forest inventory data // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 20. – DOI 10.3390/rs13204092. (Q1)
20. 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 – St. Petersburg, 2021. – P. 012078. – DOI 10.1088/1755-1315/876/1/012078.
21. 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, – Saint Petersburg, Virtual, 2021. – P. 012035. – DOI 10.1088/1755-1315/806/1/012035.
22. M. R. Vagizov, A. A. Dobrovolskyi, E. P. Istomin [et al.] Technological aspects of the development of the automated method of air-photo interpretation of forest stands // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5, Policy, Industry, Science and Education, Saint Petersburg, – Saint Petersburg, 2020. – P. 012023. – DOI 10.1088/1755-1315/574/1/012023.

Свидетельства о государственной регистрации баз данных и программ для ЭВМ.

23. М. Р. Вагизов, К. А. Витлев, В. С. Челпанов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665369 Российская Федерация. Интеллектуальная геоинформационная система (IGIS): № 2023664113 : заявл. 03.07.2023 : опубл. 14.07.2023 / ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».
24. М. Р. Вагизов, С. А. Мерзук. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620011 Российская Федерация. Трёхмерные модели лиственных пород деревьев

Лисинского учебно-опытного лесничества: № 2022623641: заявл. 13.12.2022: опубл. 09.01.2023 / ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».

25. М. Р. Вагизов, А. Р. Сулимова. Свидетельство о государственной регис-трации базы данных № 2022621192 Российская Федерация. Трёхмерные модели хвойных пород деревьев Лисинского учебно-опытного лесничества: № 2022621098: заявл. 19.05.2022: опубл. 25.05.2022 /; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».

Публикации в других изданиях

26. Вагизов М.Р., Истомина 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.
27. Вагизов М. Р. Геоинформационное моделирование лесных экосистем: инновационный способ представления данных о лесных экосистемах // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 24–28 апреля 2023 года / Под редакцией Ю.М. Казакова [и др.]. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 147-149.
28. Вагизов М. Р. Технология геоинформационного моделирования лесных экосистем // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 56-59.
29. Т. А. Герасимова, С. А. Мерзук, М. Р. Вагизов. Применение геоинформационного моделирования и геоинформационного проектирования в деятельности лесного хозяйства // Информационные системы и технологии: теория и практика : Сборник научных трудов / Том Выпуск 15. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 38-44.
30. Вагизов М. Р. Геоинформационное моделирование и искусственный интеллект // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 5. – С. 56-60. – DOI 10.31799/2949-0693-2023-5-56-60.
31. М. Р. Вагизов, В. А. Лобачева Особенности геоинформационного моделирования при мониторинге лесовосстановления // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 194-196.
32. Вагизов М. Р. Интеллектуальное геомоделирование лесных экосистем // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции, п. Нижний Архыз, 27 сентября – 01 2022 года. – Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. – С. 101-103. – DOI 10.18522/syssyn-2022-19.

33. В. С. Жалнин, М. Р. Вагизов. Геоинформационное моделирование изменений классов возраста Берёзы обыкновенной // Актуальные вопросы лесного хозяйства : материалы VI международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2022 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. Общество с ограниченной ответственностью «Реноме», 2022. – С. 216-219.
34. Вагизов М. Р. Интерактивное геомоделирование лесной экосистемы: от теории к практике // Цифровые технологии в лесном секторе : Материалы III Всероссийской научно-технической конференции-вебинара, Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2022 года / Под редакцией А.А. Добровольского: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 23-27.
35. 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, Санкт-Петербург, 25 февраля 2022 года. Том Выпуск 14. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 72-94.
36. М. Р. Вагизов, А. А. Гаврилюк. Управление лесными землями на основе геоинформационных моделей лесных экосистем // Информационные системы и технологии: теория и практика: научно-техническая конференция Института леса и природопользования СПбГЛТУ, Санкт-Петербург, 25 февраля 2022 года. Том Выпуск 14: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 94-99.
37. 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.
38. М. Р. Вагизов, Т. С. Швецова, В. В. Ломина Трёхмерное моделирование лесного квартала // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2022. – № 3(43). – С. 24-30.
39. 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: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 191-195.
40. Вагизов, М. Р. Геоинформационное моделирование лесных экосистем // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование : Сборник материалов IV всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2022 года / Научный редактор И.Е Сидорина; Санкт-Петербургская ассоциация геодезии и картографии; Университет ИТМО; Кафедра картографии и геоинформатики СПбГУ: Издательство "Политехника", 2021. – С. 329-332.
41. Вагизов, М. Р. Цифровое геомоделирование лесов: новый этап анализа данных о лесных экосистемах. Сборник научных трудов Совета молодых учёных СПбГЛТУ. Том Выпуск 1. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 4-8.

42. 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-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2020. – С. 129-133.
43. М. Р. Вагизов, К. А. Витлев, А. И. Попов [и др.] Алгоритм распознавания крон деревьев по снимкам среднего разрешения для управления геоинформационными моделями лесных экосистем // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : Сборник докладов Четвертой Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2023 года. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 131-134.
44. А. А. Гаврилюк, А. О. Бутусова, А. А. Кочерженко, М. Р. Вагизов Проектирование трёхмерной геоинформационной модели распространения лесного пожара // Информационные системы и технологии: теория и практика: Сборник научных трудов / Том Выпуск 15. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 30-37.

Отзыв на автореферат, в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д.79. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет ДС 24.2.365.01, Ученому секретарю.

В отзыве необходимо указать полностью ФИО, учёную степень и учёное звание, должность и место работы, полное наименование учреждения и почтовый адрес, телефон, электронную почту.