

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

*На правах рукописи*

Нгуен Чьонг Ан



МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ  
РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ ДЛЯ ПРИРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННОГО  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Специальность 1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук, профессор  
Ковязин В.Ф.

Санкт-Петербург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Анализ базовой технологии мониторинга земель лесного фонда Вьетнама....	11
1.2 Современное состояние технологий мониторинга земель лесного фонда в других странах .....	17
1.3 Выводы по главе 1 .....	32
<b>ГЛАВА 2 ЗОНИРОВАНИЕ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ ПО ПРИРОДНЫМ УСЛОВИЯМ.....</b>	<b>35</b>
2.1. Природные факторы, влияющие на рост и развитие лесных ресурсов в экосистемах.....	35
2.1.1 Рельеф Социалистической республики Вьетнам.....	35
2.1.2 Климат Социалистической республики Вьетнам .....	38
2.1.3 Почвы Социалистической республики Вьетнам.....	43
2.2 Зонирование лесных земель по климатическим условиям.....	47
2.3 Выводы по главе 2.....	53
<b>ГЛАВА 3 МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ.....</b>	<b>55</b>
3.1 Состояние земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам глазомерно-измерительным методом .....	55
3.2 Оценка трансформации земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам дистанционным зондированием.....	58
3.2.1 Трансформация земель лесного фонда в разных климатических зонах Вьетнама.....	58
3.2.2 Изменения оценочных показателей насаждений в разных зонах Вьетнама..	67
3.3 Выводы по главе 3 .....	74

<b>ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ОЦЕНОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ НА ПЕРСПЕКТИВУ .....</b>	<b>77</b>
4.1 Теоретические основы прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам.....	77
4.2 Методы прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда в разных зонах Вьетнама .....	81
4.3 Результаты прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда в разных зонах Вьетнама по алгоритмам CA-Markov и MOLUSCE с применением искусственной нейронной сети .....	87
4.4 Прогноз динамики сомкнутости, полноты и запаса лесных насаждений в разных зонах Вьетнама .....	98
4.4.1 Прогноз изменения сомкнутости насаждений Вьетнама.....	98
4.4.2 Прогноз изменения полноты насаждений .....	99
4.4.3 Прогноз изменения запасов древесины .....	100
4.5 Выводы по главе 4.....	101
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>104</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>106</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения .....</b>	<b>129</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>	<b>131</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** Социалистическая республика Вьетнам — это страна с узкой и вытянутой территорией в направлении с севера на юг протяжённостью около 1650 км. Поэтому климатические условия территории Вьетнама существенно различаются в разных частях страны. Разное количество осадков (1500-2500 мм) и солнечной радиации (9167-9508 МДж/м<sup>2</sup>) в регионах за год определяют состав, оценочные (таксационные) показатели насаждений, продуктивность и запас древесины. Лесной фонд Вьетнама составляет 14,7 млн. га, что эквивалентно 42% общей площади страны. Леса произрастают в горных районах, занимающих 75 % территории страны.

В связи со значительной площадью земель лесного фонда, Вьетнам сталкивается с множеством проблем, связанных с их устойчивым управлением. Среди них — сокращение площади лесов из-за изменения целевого назначения земель (строительство, сельское хозяйство и т.д.), продолжающаяся незаконная рубка лесов, а также негативные природные явления и процессы. Перевод земель из состава земель лесного фонда в земли сельскохозяйственного или промышленного назначения, земли населенных пунктов обусловлен экономическим развитием страны и ростом численности населения, что создает антропогенное воздействие на лесные ресурсы. В результате уменьшается площадь естественных лесов, что негативно сказывается на природных экосистемах, снижается способность леса поглощать диоксид углерода (CO<sub>2</sub>) и регулировать климат. Незаконная вырубка лесов обусловлена экономическими выгодами от незаконно заготовленной древесины, используемой в строительстве, производстве, изготовлении предметов искусства, а также добычей недревесных лесных продуктов. Это приводит к деградации, увеличению риска эрозии почв и наводнений в стране. Изменение климата — глобальная проблема всего земного шара, оказывающая серьезное и долговременное влияние на развитие стран. Погодные явления, такие как ураганы, наводнения и засухи, происходят все чаще, что приводит к массовой гибели древостоев и снижению наземного покрова в

стране. В результате леса утрачивают свою роль как «природного щита», усиливая разрушительные последствия стихийных бедствий.

Инструментом минимизации перечисленных проблем, в том числе, за счет планирования и прогнозирования мероприятий в сфере лесопользования и контрольно-надзорной деятельности, является мониторинг земель лесного фонда, совершенствование методического аппарата которого на сегодняшний день - перспективное направление исследований по всему миру.

**Степень разработанности проблемы.** Научные аспекты мониторинга земель лесного фонда сформировались на основе изучения и анализа трудов как вьетнамских, так и зарубежных ученых. Эти исследования позволяют выделить три основных подхода к мониторингу земель лесного фонда. *По глазомерно-измерительному методу:* Tran, V.C. (2010), Le, V.K. (2012), Nguyen, T.H. (2014), Dang, V.H. (2016), Nguyen, T.H. (2017), Tran, T.B. (2020), Kovyazin V.F. (2022). *По применению дистанционного зондирования:* Guimarães, N.; Pádua, L.; Marques, P. (2020), Alaniz, A.J.; Carvajal, M.A.; Fierro, A. (2021), Jiang, G.; Zheng, Q. (2022), Kovyazin, V.F. (2022), Skachkova, M.; Guryeva, O. (2023). *По разработке тематических карт:* Shuai, W.; Jinhu, G.; Qianlai, Z. (2020), Kovyazin, V.F. (2020), Hu, T.; Zhang, Y.; Su, Y. (2020), Andre, B.; Ronald, J.H.; Guillermo, C. (2022), Van, T.P.; Tuyet, A.T.D.; Hau, D.T. (2023), Bykova, E.N. (2024), Hantao, L.; Takuya, H.; Xiaohuan, L. (2024).

Установлено, что в условиях Вьетнама традиционные глазомерно-измерительные методы не обеспечивают необходимой точности и оперативности оценки земель лесного фонда. Тематические карты необходимы для визуализации, однако требуют обновления. В то же время технология дистанционного зондирования (ДЗЗ) доказала высокую эффективность при мониторинге лесов.

В связи с этим в научной работе предлагается использовать комплексный подход, объединяющий современные технологии инвентаризации и методы мониторинга, такие как дистанционное зондирование Земли, геоинформационные и нейросетевые технологии, что позволяет получать оперативные и достоверные

данные о лесном фонде в сочетании с картографическими и климатическими условиями Вьетнама.

**Объект исследования** – земли лесного фонда и насаждения разного состава и продуктивности, произрастающие в различных климатических зонах Социалистической республики Вьетнам.

**Предмет исследования** – технологии мониторинга лесных насаждений различного породного состава, произрастающих в различных климатических зонах Социалистической республики Вьетнам.

**Цель работы** – повышение достоверности оценки состояния земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам при их мониторинге.

**Идея работы** – для повышения достоверности оценки состояния земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам при их мониторинге насаждений необходимо учитывать разновременные данные дистанционного зондирования, глазомерно-измерительной инвентаризации, карт землепользования с применением ГИС-технологий, а также нейронных сетей.

**Задачи исследований:**

1. Изучить методику проведения мониторинга земель лесного фонда Вьетнама и других государств;
2. Разработать методику зонирования земель лесного фонда по климатическим условиям Вьетнама;
3. Провести зонирование земель лесного фонда Вьетнама по климатическим условиям;
4. Разработать алгоритм обработки данных, полученных по результатам учета и инвентаризации земель лесного фонда климатических зон Вьетнама, с учетом комплекса методов: дистанционного зондирования, глазомерно-измерительной инвентаризации и геоинформационных технологий;
5. Определить оценочные показатели земель лесного фонда в выделенных климатических зонах страны, а также сравнить динамику и выявить причины изменений указанных показателей;
6. Разработать оценочные тематические карты земель лесного фонда

Вьетнама с учетом климатических зон на период 2010-2020 г. для прогнозирования на 2025 и 2030 годы;

7. Обосновать применение технологии прогнозирования состояния земель лесного фонда Вьетнама, позволяющей получить достоверность результата с коэффициентом Каппа не ниже 0,7.

#### **Научная новизна работы заключается:**

1. Предложена методика зонирования земель лесного фонда по климатическим условиям Вьетнама;

2. Разработан алгоритм обработки данных, получаемых по результатам учета и инвентаризации лесных насаждений климатических зон Вьетнама, с учетом комплекса методов (дистанционного зондирования, глазомерно-измерительной инвентаризации и геоинформационных технологий), являющийся основой мониторинга земель лесного фонда;

3. Предложен алгоритм MOLUSCE с использованием нейронных сетей для прогнозирования оценочных показателей насаждений земель лесного фонда Вьетнама с учетом климатических зон.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, пункты 10, 27, 30 и 31.

**Теоретическая и практическая значимость** работы состоит в выполнении мониторинга земель лесного фонда Вьетнама с учетом климатических зон, в том числе зонировании земель страны по климатическим условиям; определении оценочных показателей лесных насаждений комплексом методов: дистанционного зондирования и геоинформационных технологий; прогнозировании оценочных показателей лесных насаждений с применением алгоритма MOLUSCE, основанном на нейросетевых технологиях.

Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс компанией ООО «Nguon Viet» Вьетнама, что подтверждается актом внедрения от 19.08.2024 (приложение А).

**Методология и методы исследования.** При исследовании использовались

методы эмпирического уровня: описание, наблюдение, измерение, сравнение, обобщение и моделирование. При обработке данных применены платформа геопространственного анализа Google Earth Engine и ГИС-технологии: Qgis, Arcgis, с использованием языков Python, JavaScript и алгоритма Random Forest. Прогнозирование наземного покрова выполнялось с применением алгоритмов CA-Markov, основанного на теории марковских цепей, и MOLUSCE, использующего искусственные нейронные сети. Точность классификации и моделирования наземного покрова оценена по матрице ошибок и коэффициенту Каппа.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Мониторинг лесного фонда Социалистической республики Вьетнам следует проводить на основе зонирования земель по климатическим факторам (температура, количество осадков, интенсивность солнечной радиации, длительность вегетационного периода).

2. Алгоритм обработки данных, полученных по результатам учета и инвентаризации земель лесного фонда климатических зон Вьетнама, для целей оценки и прогнозирования показателей земель лесного фонда должен включать комплекс методов: дистанционное зондирование, глазомерно-измерительная инвентаризация и геоинформационные технологии

3. Для прогнозирования оценочных показателей лесных насаждений на пятилетний период следует использовать алгоритм MOLUSCE, основанный на нейросетевых технологиях, который позволяет оценить эти показатели с точностью 0,70 по коэффициенту Каппа, в отличие от стандартно применяемого алгоритма CA-Markov (коэффициент Каппа равен 0,59).

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается согласованностью результатов дистанционного зондирования с данными глазомерно-измерительной инвентаризации лесного фонда.

**Апробация работы.** Основные положения работы сообщались, обсуждались и получили одобрение на всероссийских и международных конференциях: III национальная научно-практическая конференция «Устойчивое

развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение» (г. Омск, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, производства и образования в современном мире (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция молодых учёных и обучающихся «Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Наука, бизнес, государство» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Лес-2022» «Актуальные проблемы лесного комплекса» (г. Брянск, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция 20-21 июля 2023 г «Наука и технологии в лесопромышленном комплексе» ( г. Брянск, 2023 г.); III Международный научно-практический семинар «Управление объектами недвижимости и комплексное развитие территорий» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Наука, бизнес, производство: вызовы и решения» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.); Всероссийская (национальная) научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи-лесному комплексу России» (г. Екатеринбург, 2024 г.); Международная студенческая неделя науки СНН-2024 (г. Москва, 2024 г.); XX Всероссийская конференция-конкурса студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.); IV Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Управление объектами недвижимости и комплексное развитие территорий» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.).

**Личный вклад автора** заключается в: участии в постановке цели и задач исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении зонирования лесных земель по климатическим факторам; обработке и дешифрировании космоснимков Landsat-7, 8 и Sentinel-2 с применением ГИС-технологий: Arcgis, Qgis, Google Earth Engine; разработке тематических карт 2010, 2015, 2020 годов наземного покрова по климатическим

зонам; обоснованном выборе метода прогнозирования оценочных показателей между алгоритмами CA-Markov и MOLUSCE с искусственными нейронными сетями; анализе и обобщении результатов полевых экспериментальных исследований; апробации результатов исследований на научных конференциях; написании научных публикаций по теме диссертации.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 15 печатных работах (пункты списка литературы № 4 – 14, 16, 65, 67 – 68), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложение Б).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 131 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка, 30 таблиц, список литературы из 141 наименования.

**Благодарность.** Автор выражает благодарность и искреннюю признательность научному руководителю, д.б.н., профессору Ковязину В.Ф. за ценные советы; преподавателям кафедры землеустройства и кадастров Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за важные замечания и предложения на каждом этапе исследования.

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Анализ базовой технологии мониторинга земель лесного фонда Вьетнама

Мониторинг земель лесного фонда позволяет оперативно отслеживать изменения в состоянии лесных насаждений, обусловленные лесопользованием, природными и антропогенными воздействиями на древостой, а также прогнозировать изменения леса при его эксплуатации, охране и защите. В настоящее время во Вьетнаме применяется традиционный мониторинг земель лесного фонда, основанный на полевых методах и ручном труде для проведения исследований, оценке данных лесоустроителями и их статистическому учете. Такая деятельность направлена на сбор информации о состоянии лесных земель, характеристиках и изменениях лесных насаждений и требует высокого уровня профессиональных навыков для оценки состояния лесных насаждений [60]. Полевой наземный учет лесного фонда проводится по строго регламентированной процедуре, включающей несколько этапов: подготовка к исследованию, проведение исследования, обработка и анализ данных, а также разработка документов и карт по лесным землям провинций. *Подготовительный этап исследования* направлен на определение целей, масштабов и методов исследования. На этом этапе рабочие группы распределяются по задачам, подготавливают необходимые материалы, а также проходят обучение по использованию измерительных приборов и методам измерения ключевых параметров древостоев.

*Этап проведения полевых исследований* включает работу на выборочных участках и использование специализированного оборудования для измерений. Выбор участков (таксационные кварталы) проводится в лесах, различающихся по составу, возрастной структуре и лесорастительным (экологическим) условиям. На каждом выборочном участке собираются данные о структуре древостоя, запасах биологической массы (древесины), видовом биологическом разнообразии и других экологических показателях [24]. В полевых исследованиях используются такие инструменты, как компасы, рулетки, GPS-навигаторы, высотомеры разных

типов, мерные вилки различных марок и камеры для фиксации измеряемых параметров. Для сбора информации о землепользовании, а также о состоянии земель лесного фонда проводятся интервью и опросы местных жителей, чьи земли участвуют в процессе исследования или оценки.

Полевые методы исследования земель лесного фонда во Вьетнаме основаны на ручных измерениях, наблюдениях и фиксации данных.

+ *Метод ручных измерений деревьев и древостоев* является специфическим для полевых исследований в мониторинге лесных ресурсов. Для него применяются рулетки длиной 50 м и более, высотомеры и мерные вилки. Видовой состав древесных пород определяется визуально по форме листьев или хвои [11]. Расчет биомассы (запаса) древесины производится по специальным таблицам из справочника таксатора [121]. Биологическое разнообразие лесной экосистемы оценивается по количеству видов растений и животных, определенных с помощью соответствующих определителей.

+ *Метод наблюдения и фиксации* используется для отслеживания природных явлений и антропогенных воздействий на земли лесного фонда. Он предполагает непосредственное наблюдение и запись состояния лесов и связанных с ними процессов с помощью фото- и видеокамер [132].

*Этап обработки и анализа данных* включает интеграцию собранной информации в базы данных, применение статистических методов и моделирования для анализа, выявления тенденций изменений состояния и оценки качества лесов.

*Разработка документов и карт* осуществляется с использованием компьютерных технологий и специализированного программного обеспечения. Создаются таксационное описание, план лесонасаждений и пожарная карта лесничества.

Рассмотрим недостатки полевого мониторинга лесных земель на примере трех провинций Вьетнама — Тхань Хоа, Кон Тум и Донг Най, где лесной фонд инвентаризируется традиционными методами [14]. Эти провинции представляют север, центр и юг Вьетнама, что обуславливает различия в природно-

климатических условиях и, соответственно, особенности лесных экосистем в каждом регионе.

*Провинция Тхань Хоа* отличается разнообразным рельефом, который включает равнины, низкогорья и среднегорья. Леса здесь сосредоточены преимущественно в горных районах на западе и северо-западе, тогда как восточная часть и прибрежные территории представляют собой равнины, где доминирует сельское хозяйство и рыболовство [8]. Климат провинции — тропический муссонный с жарким и влажным летом и сухой прохладной зимой. Среднегодовое количество осадков составляет 1600–2200 мм, а солнечная радиация — 8600–9100 МДж/м<sup>2</sup> [10]. Обследования состояния лесов и выявление незаконных вырубок здесь усложнены из-за труднодоступности горной местности, что затрудняет патрулирование и мониторинг. Эти условия также создают благоприятные возможности для незаконной добычи и транспортировки древесины [63]. Дополнительно ограниченность лесных ресурсов из-за рельефа снижает эффективность защиты лесов от пожаров и выполнения мероприятий по их охране и восстановлению. Географическое положение провинции Тхань Хоа показано на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Географическое положение провинции Тхань Хоа [10]

*Провинция Кон Тум*, расположенная в зоне развития Индокитайского треугольника (Камбоджа, Лаос, Вьетнам), имеет протяженную границу (около 292 км) и играет важную роль в культурно-экономическом обмене [5]. Здесь преобладают среднегорья и высокогорья с многочисленными горными хребтами и плато, а климат характеризуется чередованием влажного и сухого сезонов. Среднегодовое количество осадков составляет 2000–2500 мм, большая часть которых выпадает в сезон дождей, а солнечная радиация — 9000–9400 МДж/м<sup>2</sup> [67]. Природные условия способствуют росту естественных лесов с большим разнообразием древесных пород и значительным приростом древесной биомассы. В этих лесах обитают многие редкие и эндемичные виды животных и растений [90]. Однако мониторинг лесного фонда затруднен из-за сложного высокогорного рельефа, что снижает качество и точность проводимых наблюдений. Ограниченные ресурсы и устаревшие технологии также негативно сказываются на точности данных об экосистемах Кон Тум. Географическое положение провинции Кон Тум показано на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Географическое положение провинции Кон Тум [67]

*Провинция Донг Най* имеет рельеф с низкими горами, холмами и равнинами. Климат характеризуется муссонным типом, с дождливым сезоном с мая по ноябрь и сухим сезоном с декабря по апрель. Среднегодовое количество осадков составляет 1500–2000 мм, а солнечная радиация — 9100–9500 МДж/м<sup>2</sup> [76]. С лесной площадью в 181 тыс. га и лесистостью 29% Донг Най обладает самыми обширными лесами во Вьетнаме, представленными естественными и искусственными экосистемами [6]. Несмотря на высокий уровень урбанизации, здесь придается особое значение сохранению и восстановлению лесов, а также поддержанию биологического разнообразия [97]. Национальный парк Каттъян, расположенный в Донгнай, является одной из ключевых охраняемых природных территорий Вьетнама и важной зоной сохранения редких видов флоры и фауны [1]. Однако мониторинг здесь также осуществляется с помощью традиционных полевых методов, что затрудняет полное изучение лесов из-за нехватки трудовых ресурсов и устаревшего технического оборудования [79]. Географическое положение провинции Донг Най показано на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Географическое положение провинции Донг Най [6]

Технология мониторинга земель лесного фонда в трех провинциях, расположенных в различных частях Вьетнама, в настоящее время предполагает использование наземного полевого метода. Однако его применение ограничено природными условиями страны и рядом других факторов. Рассмотрим наиболее значимые из них.

*Вьетнам — страна с обширными лесными ресурсами*, площадь которых по состоянию на 1 января 2023 года составляет 14 745 201 га [2]. При лесистости 42,2% необходимы современные технологии для мониторинга лесных земель. Наземный мониторинг требует значительных людских ресурсов, но в стране часто наблюдается нехватка квалифицированных специалистов. Количество исследователей и лесоустроителей недостаточно для охвата всей площади лесного фонда. Кроме того, полевые исследования связаны с высокими финансовыми затратами, включая транспортные и командировочные расходы, закупку оборудования и оплату труда [137].

*Ограничения технического характера* также снижают эффективность наземного мониторинга. Методы ручного измерения состояния и характеристик древостоев обладают большей погрешностью по сравнению с современными технологиями, особенно в сложных погодных условиях (дождь, жара, ветер), что затрудняет получение точных данных [124]. Кроме того, существуют *временные ограничения и проблемы с охватом территории*. Полевые исследования могут проводиться только в определенные часы суток и сезоны, что препятствует непрерывному наблюдению, возможному при использовании современных технологий. К тому же природные условия и рельеф Вьетнама являются сложными: почти  $\frac{3}{4}$  территории занимают горы, что затрудняет мониторинг лесов, особенно в труднодоступных районах с пересеченной местностью [126].

Таким образом, полевые методы мониторинга играют важную роль в контроле состояния земель лесного фонда Вьетнама. Однако нехватка кадров, технические ограничения, а также временные и пространственные трудности создают значительные вызовы. Для их преодоления необходимо внедрение современных технологий, таких как дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и

географические информационные системы (ГИС). Эти технологии позволят повысить эффективность, точность и непрерывность мониторинга лесных ресурсов, а также снизить нагрузку на людские ресурсы и финансовые затраты.

## **1.2 Современное состояние технологий мониторинга земель лесного фонда в других странах**

Мониторинг земель является глобальной задачей, направленной на оценку состояния лесного фонда, обеспечение его защиты, охраны и рационального управления, особенно для стран, обладающих значительными лесными ресурсами. Многие государства внедряют передовые технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для повышения эффективности при мониторинге земель лесного фонда. Использование данных ДЗЗ становится актуальным трендом в условиях неуклонного развития научных и технологических отраслей. ДЗЗ представляет собой технологию получения информации о земной и водной поверхности путем регистрации отраженной электромагнитной энергии. Эта технология находит широкое применение в сельском и лесном хозяйствах, мониторинге окружающей среды, оценке деградации почв, океанографии, геологии и других областях [7]. В качестве платформ для ДЗЗ преимущественно используются спутники, которые обеспечивают наблюдение за большими территориями и их систематическое покрытие. Согласно исследованиям ПаланиМуругана и Ниту Патхак (2019), для ДЗЗ наиболее подходят полярные спутники, находящиеся на низкой околоземной орбите. Они обладают способностью обеспечивать глобальное покрытие поверхности Земли, что делает их особенно эффективными для задач мониторинга [87].

Комбинация данных от нескольких оптических спутниковых датчиков, таких как ALOS PALSAR, способствует улучшению анализа и интерпретации данных ДЗЗ. При оценке данных ДЗЗ обсуждаются четыре типа разрешения: пространственное, спектральное, временное и радиометрическое [34]. На рисунке 1.4 показана структура рельефа изучаемой территории с помощью снимка ALOS-2.

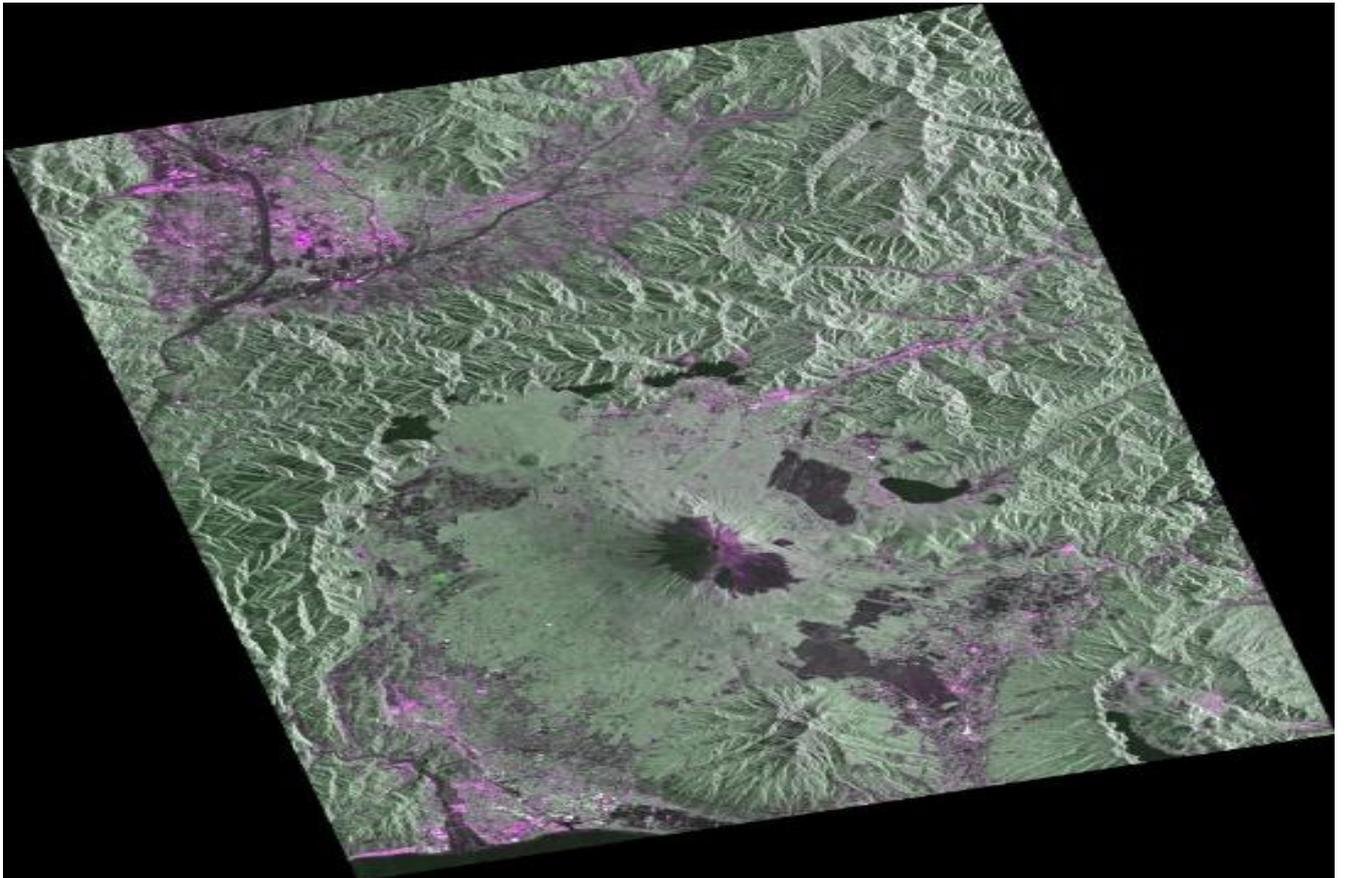


Рисунок 1.4 – Изучение структуры рельефа лесного фонда по снимкам ALOS-2 [45]

Развитие методов дистанционного зондирования предоставляет огромное количество наборов спутниковых данных о земной поверхности в больших и в малых масштабах. Дистанционное зондирование является экономичным, рентабельным и более точным методом, важным источником информации о наземном покрове. Данные ДЗЗ в сочетании с полевыми исследованиями увеличивают достоверность и точность лесоустроительных работ и упрощают составление тематических карт по лесному фонду. Интеграция данных ДЗЗ с геоинформационными системами (ГИС) позволяет ускорить обработку, классификацию и оценку наземного покрова [20]. Быстрое развитие ГИС, таких как наблюдение за Землей (Earth Observation), сделало возможным осуществлять мониторинг окружающей среды в различных географических зонах и анализ этих изменений как во времени, так и в пространстве [88].

В настоящее время существует множество публикаций о технологиях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые широко используются во

многих областях науки, включая лесное хозяйство. На основе этих данных опубликовано много ценных исследований. В работе Yan Zhu, Zhongke Feng, JingLu, Jincheng Liu (2020) для точной оценки мезомасштабной (региональной) биомассы лесов предложено использовать результаты инвентаризации лесов (FID) Китая, которые получены по снимкам Landsat 8 OLI и данные ALOS-2 PALSAR-2 для установления границ различных по составу лесов (смешанных, хвойных и широколиственных) [141]. Китайские ученые оценили потенциал оптических (Landsat 8 OLI) и радиолокационных (ALOS-2 PALSAR-2) данных для определения и картографирования биомассы лесных ресурсов. По этим данным получен широкий спектр оценочных параметров структуры лесных угодий. При моделировании биомассы леса использован метод пробных площадей (Random Forest) на основе этих параметров построена множественная линейная регрессии [139]. По ней определена биомасса (запас) древесины.

Китайские ученые, загрузив из Геологической Службы США (USGS) изображения снимков Landsat-8 уровня L1T провели картографирование запасов органического углерода лесной почвы [41]. Изображения охватывали изучаемую территорию северо-запада страны в период с июля по сентябрь 2016 года при облачности менее 10%. Для коррекции мультиспектральных данных дистанционного зондирования применён метод атмосферной коррекции среды для визуализации изображений (ENVI) Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH). Авторы использовали метод билинейной интерполяции для преобразования этих данных в растровый формат с пространственным разрешением 30 м в программе ArcGIS 10.2.

Данные дистанционного зондирования получают от двух типов датчиков: активных и пассивных. Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки и может быть использован в различных природно-климатических условиях [71]. Пассивные датчики регистрируют электромагнитные волны, которые излучают сами объекты исследования, или отражают солнечную энергию. Активные датчики сами излучают электромагнитные волны и затем регистрируют отраженные сигналы. Спутниковые снимки являются примером пассивного

дистанционного зондирования, в то время популярными активными технологиями являются Лидар (LiDAR) и Радар [101]. Развитию и применению этих двух технологий посвящено множество исследований. По мнению Хюрана Джина и Гиоргоса Маунтракиса (2022 г.), интеграция данных из нескольких источников становится всё более важной для классификации земного покрова, требуя интеграции оптических, радарных (SAR) и лидарных данных [59]. Радары SAR L-диапазона обладают высокой чувствительностью к земному покрову и используются для оценки различных параметров растительности, таких как древесная биомасса (запас древесины) [29]. Однако, оценка биомассы растительности затруднена влиянием на обратное рассеяние факторов внешней среды: геометрия изображений, характеристика датчика SAR, топография, условия увлажнения местности. Высокое разрешение данных снимков Sentinel-1 позволяет проводить анализ временных рядов SAR [50]. На рисунке 1.5 показано применение LiDARa для обнаружения точек при изучении лесного растительного покрова.

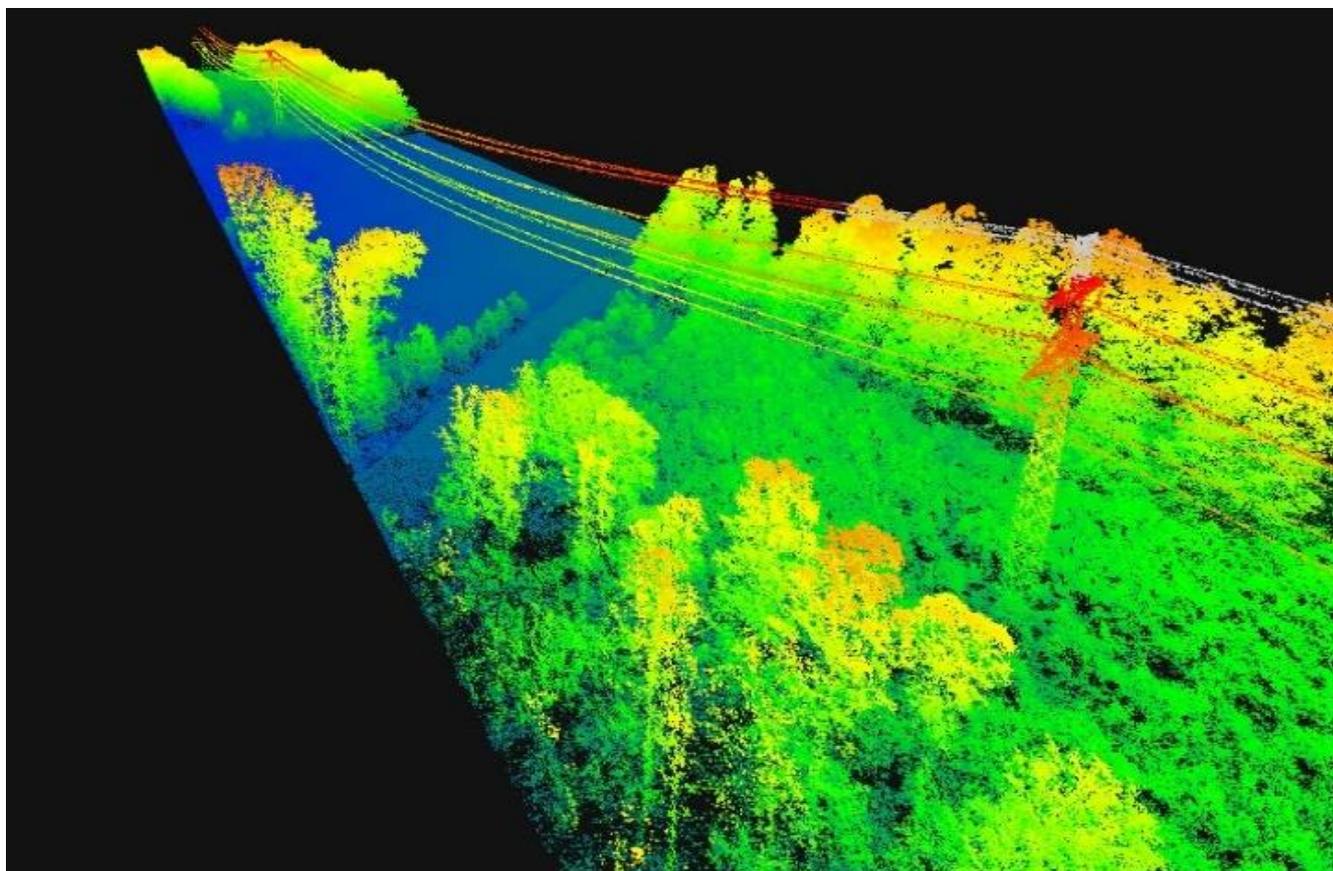


Рисунок 1.5 – Применение LiDARa для обнаружения пород деревьев в насаждении [107]

Каждая точка характеризуется своей высотой и отображается разным цветом. Более темные оттенки красного обозначают точки, расположенные на большей высоте, что помогает определить распространение видов растений, различающихся по высоте. Для обнаружения каждого дерева и определения его местоположения также применяются специализированные алгоритмы.

В современных условиях спутниковое дистанционное зондирование играет важную роль в сборе данных наземного покрова, благодаря непрерывному режиму и постоянно улучшающейся технологии работы. Однако нельзя недооценивать роль современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и беспилотных летательных средств (БЛС) для аэрофотосъемки [46]. Высокое пространственное и временное разрешение, гибкость и низкие эксплуатационные расходы делают эти средства привлекательной альтернативой традиционным платформам ДЗЗ. По мнению автора [86], БПЛА являются одним из наиболее подходящих инструментов в управлении лесными ресурсами, благодаря следующим преимуществам: 1) низким эксплуатационным расходам и высокой частоте сбора данных; 2) возможностью установки широкого спектра датчиков, которые настраиваются под конкретные задачи исследования; 3) способностью планировать исследования с учетом погодных условий и обеспечением доступностью данных по запросу; 4) возможностью использования в реальном времени. Инвентаризация, оценка и мониторинг лесных ресурсов является дорогостоящим и трудоемким процессом. В последние годы БПЛА претерпели значительные изменения, способствующие повышению эффективности затрат и времени [51]. БПЛА используются для сбора данных по различным типам растительного покрова (как чистыми, так и смешанными по составу пород), включая природные экосистемы в целом, где сложно проводить полевую спектроскопию. Параметры полета БПЛА, такие как высота, скорость и угол обзора, могут настраиваться в зависимости от требований мониторинга, что обеспечивает возможность легко изменять зону покрытия земли путем регулирования поля зрения и высоты полета.

Во Вьетнаме применение современных технологий и оборудования дистанционного зондирования ограничено по причине зависимости лесоустроителей от традиционных методов учета и недостаточного количества специалистов в этой области. Кроме того, топографические, климатические и почвенные условия создают ограничения для использования технологий дистанционного зондирования. Во Вьетнаме часто неустойчивая погода с большим количеством облаков в дождевые сезоны, что ухудшает качество снимков [66].

Для обработки и классификации данных дистанционного зондирования в мире разработано множество технологий, поддерживаемых глубокими исследованиями и анализом многих ученых [108, 85, 114]. Использование спектральных и текстурных признаков на изображениях ДЗЗ всегда сложно из-за разнообразия ландшафтов, что может привести к ошибкам в семантической сегментации результатов. В статье [22] предлагается объектно-ориентированная модель Марковского случайного поля, основанная на иерархическом древе сегментации со вспомогательными метками. Изображения дистанционного зондирования сегментируются, и на основе исходных сегментов строится иерархическое древо сегментации с использованием критериев слияния. Затем на этой структуре устанавливается объектное марковское случайное поле со вспомогательными метками. Для решения этой модели применяется вероятностный вывод путем итеративного обновления полей меток и вспомогательных полей. Эксперименты на изображениях «Worldview-4» показали достоверность и точность данного подхода к семантической сегментации [42]. В условиях климатических изменений правильная и достоверная информация о фенотипе листьев играет ключевую роль в раннем выявлении заболеваний растений. В последние годы произошло значительное расширение возможностей прогнозирования и идентификации растений в реальном времени в цифровой лесной среде. Экономически эффективное, автоматизированное и своевременное обнаружение состояния растений важно для устойчивого развития лесных экосистем. В статье [102] представлен неинвазивный метод, направленный на

создание осуществимой и жизнеспособной технологии для точной идентификации и наблюдения за состоянием видов растений на клеточном уровне в течение четырех дней подряд с использованием машинного обучения для определения характеристик листовой пластинки в диапазоне частот от 0,75 до 1,1 ТГц. При исследованиях применены три алгоритма машинного обучения: случайный лес (RandomForest), машина опорных векторов (Support Vector Machine - SVM) и К-ближайший сосед (K-NearestNeighbor) [134]. Алгоритм K-NearestNeighbor (KNN) использован для инвентаризации лесов спутниковым методом для картографирования обширных удаленных районов. Он способен расширять информацию о характеристиках лесных угодий, используя данные инвентаризации, полученные из спутников Landsat [75]. На рисунке 1.6 показана классификация наземного покрова с использованием метода машины опорных векторов (SVM) на основе спектрального отклика, текстуры и топографических факторов, полученных в результате анализа вегетационных индексов.

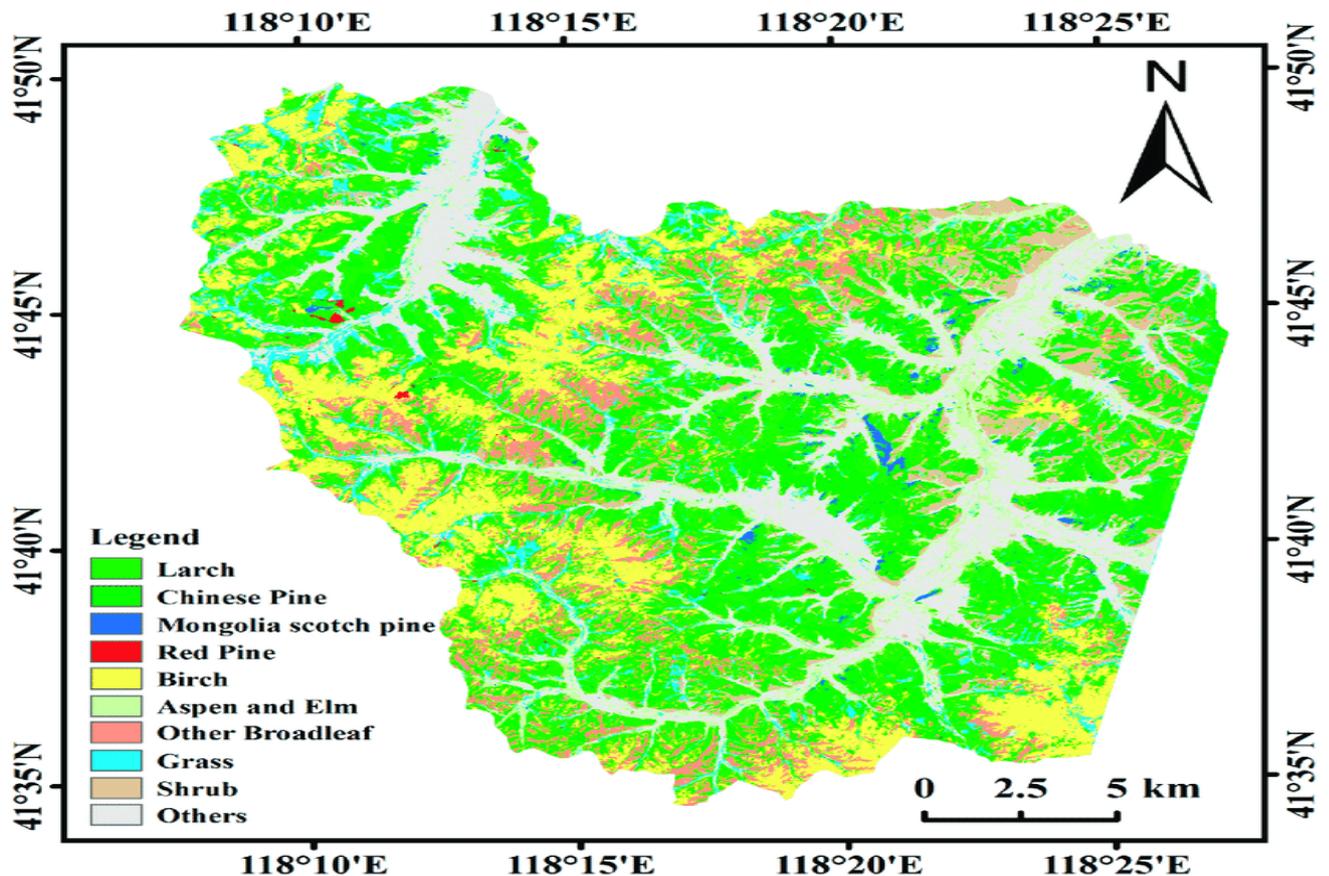


Рисунок 1.6 – Классификация лесных угодий по составу древесных пород с использованием опорных векторов (SVM) [117]

Каждый цвет представляет собой отдельный видовой состав растительности. Среди них наибольшую площадь занимают лиственница и китайская сосна (зеленая), за ней следуют береза (желтая) и некоторые другие породы широколиственных деревьев. Остальные виды растительности занимают незначительные площади.

Исследования [38] показали возможность применение методов машинного обучения для обработки данных ДЗЗ и классификации объектов исследования с использованием различных алгоритмов. Такой подход стал применяться для прогнозирования состояния земель лесного фонда. Прогнозирование важно не только для разработки стратегии по охране, защите и восстановлению лесных ресурсов, но и для оценки стихийных бедствий в экстремальные погодные явления, которые могут возникнуть в будущем [133]. Лесная растительность является одним из ключевых факторов, влияющих на экологическую среду Земли [12]. Департаментам лесного хозяйства провинций Вьетнама необходимо регулярно проводить инвентаризацию лесного фонда для получения основных таксационных (оценочных) показателей, таких как видовой состав древостоев, его густота, сомкнутость, состояние древесной растительности и динамически отслеживать изменения в лесном покрове. Глубокое обучение — это метод машинного обучения, который появился в последние годы. Метод способен автоматически анализировать структуру и закономерности насаждений в большом объеме данных для идентификации, оценки или прогнозирования будущих сведений лесного фонда и в значительной степени повышать точность классификации и распознавания объектов исследования [135]. Изменение лесного покрова тесно связано с природными и антропогенными факторами: наводнениями и подтоплениями земель из-за обильных дождей. Риск наводнений возрастает вследствие изменения климата на локальном и глобальном уровнях. Динамику изменения лесопользований можно отслеживать с использованием данных ДЗЗ. Доступность данных ДЗЗ предоставляет широкий спектр вариаций разрешений, включая спектральное, пространственное, радиометрическое и временное, которые можно широко использовать для обнаружения изменений

земной поверхности. Интеграция данных дистанционного зондирования и модели CA-Markov могут быть применены для прогнозирования использования в дальнейшей перспективе лесных угодий, что является важным инструментом для оценки и управления лесными ресурсами [28, 116]. Для эффективного мониторинга лесных ресурсов, особенно для выделения видового состава растений на исследуемых территориях, используют различные вегетационные индексы (VegetationIndices – VI) [109]. Эффективное применение системы VegetationIndices - VI имеет большое значение для управления лесными ресурсами Вьетнама [13]. Проводится несколько исследований, подтверждающих возможность использования этой системы для различных целей. На северо-востоке Ирана провели исследования наземной биомассы (запаса травостоя) полузасушливых засоленных пастбищ [43]. Исследователи отмечают, что ДЗЗ значительно облегчило оценку надземной биомассы на пастбищах. Для более точной оценки надземной биомассы, особенно в засушливых районах предложены индексы растительности с учетом типов почвы [130]. Существует несколько вегетационных индексов, которые по формуле расчета и функциональным требованиям можно разделить на три типа: простой, модифицированный и функциональный вегетационные индексы [103, 64]. Оценка видового состава растительного покрова и его биомассы часто проводят путем вычисления различных вегетативных индексов растительности для автоматизированного управления лесами [23]. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), отражающий характер сезонного роста растительности, широко используется для различения типов землепользования и земного покрова [129]. Красные каналы Sentinel-2 позволяют вычислять большое разнообразие спектральных вегетационных индексов, включая NDVI, и применяются для оценки состояния растительности [55]. На рисунке 1.7 показана формула для вычисления индекса NDVI.

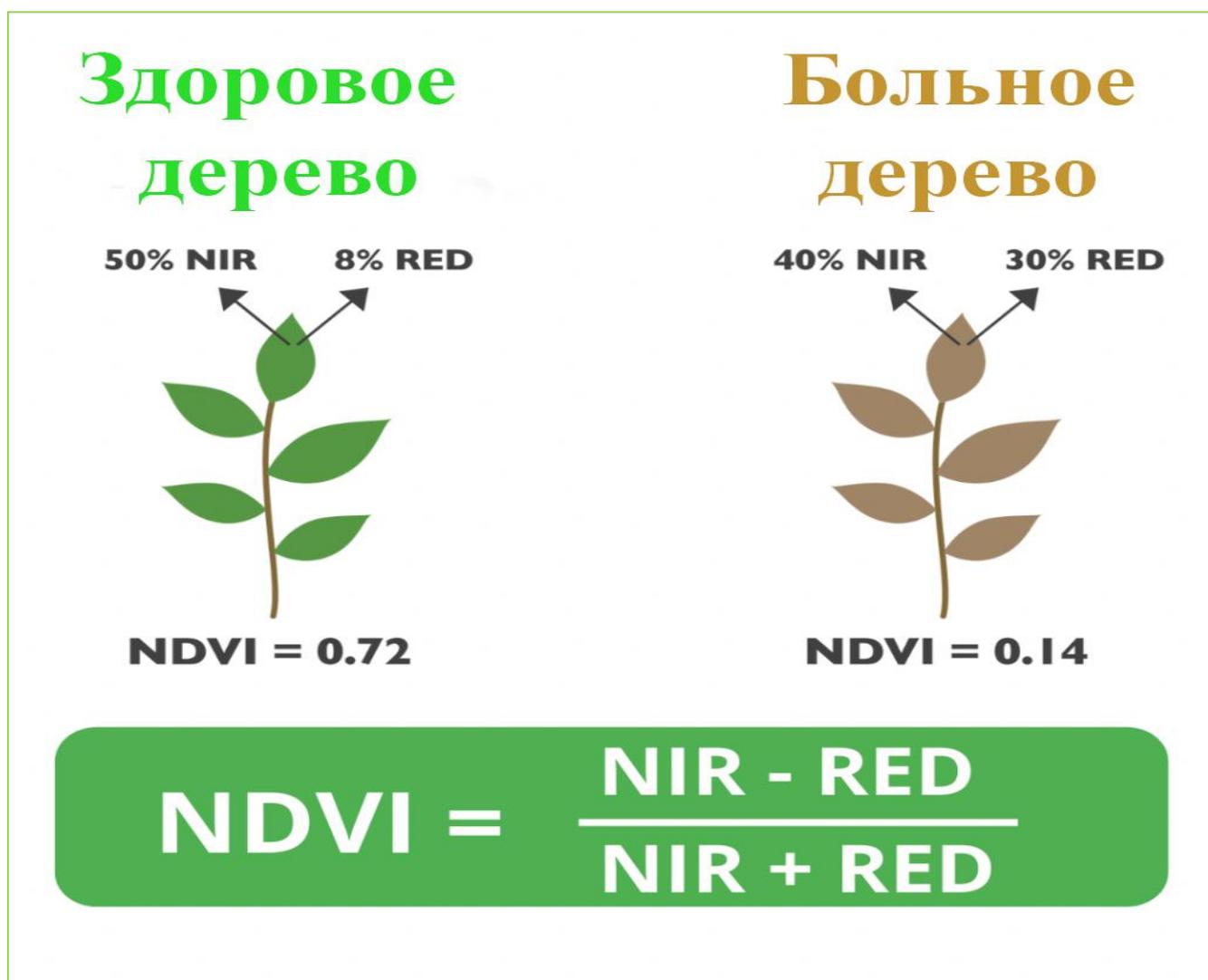


Рисунок 1.7 – Формула для вычисления индекса NDVI на примере состояния дерева [17]

Соответственно, значение этого показателя зависит от уровня отражения растениями ближнего инфракрасного излучения и излучения красного света. Здоровая растительность имеет более высокий уровень отражения ближнего инфракрасного излучения и, следовательно, имеет более высокое значение NDVI. Напротив, районы с больной растительностью имеют тенденцию поглощать это излучение и сильно отражать красный свет, что приводит к более низким значениям NDVI. Доля поглощенной фотосинтетически активной радиации (ФАР) растительным покровом является одним из ключевых биофизических параметров, используемых для оценки продуктивности природной экосистемы и изучения взаимосвязей между динамикой растительности и глобальными изменениями климата и антропогенными воздействиями на ресурс [54, 49].

В Соединенных Штатах Америки широко используются технологии ДЗЗ, ГИС, ЛИДАР, РАДАР и другие. Геологическая служба США (USGS) и NASA предоставляют спутниковые изображения с миссией Landsat и MODIS для отслеживания изменений площадей различных категорий земель в том числе и лесных [83]. Система Global Forest Watch (GFW) является крупным проектом разработки глобальной платформы мониторинга лесов с целью предоставления оценочных данных и инструментов для отслеживания состояния, деградации и восстановления лесов [32]. Южноамериканская страна *Бразилия* с обширным Амазонским лесным массивом использует ДЗЗ и ГИС для мониторинга лесов. Национальный институт космических исследований Бразилии (INPE) разрабатывает и внедряет программы, такие как PRODES и DETER, для отслеживания площади и границ лесосек в процессе вырубке древостоев. Программа DETER использует спутниковые данные для быстрого обнаружения лесосеки и сведения о вырубке, что позволяет органам власти оперативно регулировать нарушения [21]. *Индонезия* применяет также ДЗЗ, ГИС и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для мониторинга лесов. Национальная система мониторинга лесов Индонезии (SIPON) использует данные из различных источников для отслеживания состояния растительности, нарушений земель, а также управления лесными ресурсами [136]. Система REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) Индонезии позволяет отслеживать и информировать органы власти о повышении выбросов в атмосферу в результате вырубки и деградации лесов. *Австралия* использует ДЗЗ и ГИС для мониторинга и управления лесными ресурсами. Фирма GeoscienceAustralia предоставляет данные спутников, таких как Landsat и Sentinel, для отслеживания изменений в состоянии, площади и деградации лесов. Национальная система учета углерода (NCAS) Австралии использует спутниковые данные для оценки уровня содержания углерода (CO<sub>2</sub>) на лесных землях и в лесных почвах [74]. *Народная республика Китай* также применяет ДЗЗ, ГИС и БПЛА для мониторинга своей территории. Министерство лесного хозяйства и Национальная администрация лесов Китая реализуют программы

мониторинга лесов на основе изображений от местных спутников, таких как Gaofen [127]. Система мониторинга лесных ресурсов (Forest Resource Monitoring System) является крупным проектом, который помогает Китаю эффективно отслеживать и управлять природными ресурсами, особенно в проектах по восстановлению, охране и защите лесов. В Российской Федерации применение технологий дистанционного зондирования и географических информационных систем (ГИС) в управлении и мониторинге лесных ресурсов сыграло важную роль в выявлении динамики лесов и защите окружающей среды. Согласно исследованию Э. Г. Швецова и другие (2024), данные дистанционного зондирования со спутников MODIS позволили оценить сокращение площади лесов из-за пожаров в Сибири с 2000 по 2015 гг [111]. Кроме того, ГИС-системы используются для интеграции пространственных данных, поддержки планирования устойчивого использования лесных ресурсов и раннего обнаружения деградации экосистем [69]. Сочетание инструментов обработки спутниковых изображений и пространственного моделирования в ГИС также позволяет прогнозировать тенденции деградации лесов под воздействием изменения климатических и антропогенных воздействий. Применения ДЗ и ГИС способствуют повышению эффективности управления лесами, особенно с учётом того, что Россия владеет более чем 20 % площади лесов мира и сталкивается с многочисленными проблемами в сохранении природных ресурсов. В последние годы наблюдается существенное развитие ДЗЗ и технологий сенсоров. Оптические орбитальные датчики, такие как MODIS/Terra для формирования изображений среднего разрешения и оперативный сканер OLI/Landsat-8, широко применяются для картографирования земель и мониторинга сельскохозяйственной и лесной деятельности [106]. Технология ДЗЗ имеет ряд преимуществ перед наземным мониторингом лесных земель.

*Широкий и непрерывный охват земель* - это одно из выдающихся преимуществ технологий дистанционного зондирования по сравнению с традиционными полевыми методами мониторинга. Широкий охват данной технологии выражается в нескольких аспектах: большая площадь наблюдения,

разнообразие данных. Спутники дистанционного зондирования способны делать снимки и собирать сведения на больших территориях по всему миру, от нескольких сотен до нескольких тысяч квадратных километров за одно сканирование, охватывая при этом разные уголки: городские земли, лесной и водный фонды, пустыни и океаны, что обеспечивает всесторонний обзор земной поверхности [138]. Например, спутник Landsat способен охватывать полосу шириной около 185 км за один снимок. Разнообразие полученных данных дистанционного зондирования обосновывается спектральными диапазонами (от оптического и инфракрасного до радиолокационного) снимков. Это свойство позволяет изучать множественные характеристики поверхности Земли: растительный покров, рельеф местности и другие экологические особенности [57]. Кроме того, данные ДЗЗ предоставляют многомерную информацию, включая пространственные характеристики, спектральную информацию, рельеф и уклон местности. ДЗЗ применяется во многих странах и в разных областях науки и производства. В сельском хозяйстве эта технология используется для мониторинга посевных площадей, оценки состояния посевов и прогнозирования урожайности. Значительную роль играет ДЗЗ в сфере управления природными ресурсами и противодействию стихийным бедствиям, а также в оценке воздействия изменения климата на окружающую среду [56]. В частности, в лесном хозяйстве технологию ДЗЗ применяются для мониторинга изменений площади различных по составу лесов, выявления незаконной вырубке древесины и оценки санитарного состояния лесной экосистемы. Непрерывность данных ДЗЗ проявляется в высокой частоте наблюдений и возможности хранения исторических данных для анализа изменений и прогнозирования состояния лесов. Многие спутники дистанционного зондирования имеют короткий цикл вращения, что позволяет собирать новые данные о той же территории с высокой частотой. Например, спутник Sentinel-2 программы Copernicus Европейского Союза имеет цикл вращения около 5 дней [61]. Непрерывное наблюдение позволяет этой технологии фиксировать изменения поверхности Земли во времени, что обеспечивает своевременное получение информации для принятия

управленческих мер. Исторические данные ДЗЗ позволяют анализировать изменения объектов в течение длительного времени, изучать долгосрочные тенденции и динамику изменения природной и антропогенной сред. В мониторинге земель лесного фонда непрерывность данных ДЗЗ помогает своевременно выявлять незаконные вырубki неспелых и спелых древостоев, обнаруживать лесные пожары, очаги вредителей и болезней леса, что позволяет оперативно принимать меры по охране и защите древостоев [113].

*Высокая точность технологий ДЗЗ* проявляется через несколько аспектов, таких как пространственное, спектральное, временное разрешение и точность географических данных. В отношении пространственного разрешения современные спутники непрерывно улучшаются. Помимо широко используемых спутников, таких как Landsat (разрешение 30 м) и Sentinel (разрешение 10 м), современные спутники, такие как WorldView-3 и GeoEye-1, достигают разрешения до 30 см [37]. Это позволяет идентифицировать малые объекты и детали на поверхности Земли. Широкий спектр данных ДЗЗ позволяет различать различные объекты на поверхности Земли и точно анализировать состав их материалов. В аспекте временного разрешения, спутники имеют короткий период обращения от нескольких дней до недели, что позволяет непрерывно собирать данные и регулярно обновлять все изменения [84]. Современные спутники обычно интегрированы с системами глобального позиционирования (GPS) и другими системами позиционирования, что помогает точно определять координаты точек на поверхности Земли. Эти факторы обеспечивают высокую достоверность данных дистанционного зондирования. В контексте адаптации к изменению климата, управления природными ресурсами и устойчивого развития технологии ДЗЗ играют все более важную и необходимую роль.

*Экономия времени и затрат.* Технологии ДЗЗ позволяют существенно сократить использование прямых рабочих сил, экономит время и средства по сравнению с полевым методом. Технологии ДЗЗ позволяют собирать данные на больших территориях за короткие сроки, что помогает сократить время, необходимое для получения данных по сравнению с традиционным наземным

методом. Современные инструменты анализа и программное обеспечение для обработки данных ДЗЗ автоматизируют многие традиционные процессы, минимизируют вмешательство человека и экономят время [48]. Использование спутников или беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для аэрокосмического обзора помогает экономить средства и уменьшать потребность в развертывании исследований большими группами научных сотрудников и хозяйственников на местности [105]. В настоящее время многие программы обработки данных предоставляются бесплатно для пользователей, например, программа Landsat от NASA и программа Copernicus от ESA. Кроме того, технологические прорывы и конкуренция на рынке способствуют снижению стоимости оборудования для ДЗЗ и вспомогательных инструментов [120].

*Возможность интеграции ДЗЗ с ГИС* обладает исключительными преимуществами в обработке, хранении и анализе пространственных данных, позволяя точно отслеживать масштабные изменения лесного фонда. Гибкость ГИС в интеграции с данными ДЗЗ способствует повышению качества мониторинга лесов за счёт обновления информации в режиме реального времени и моделирования изменяющихся тенденций в лесных насаждениях. По данным Рэнди Шоустек (2014), такое сочетание эффективно поддерживает глобальные программы мониторинга лесов, такие как Global Forest Watch [110]. Кроме того, исследование Азаде Абдоллаханеджад и других (2019) показало, что интеграция спутниковых снимков высокого разрешения с ГИС позволяет определять сплошные вырубку лесов, тем самым обеспечивая своевременные и эффективные меры восстановления [19]. Из приведенных исследований видно, что многие страны мира применяют передовые технологии ДЗЗ и ГИС для мониторинга земель. Но каждая страна имеет свои технологии и программы, которые определяются природными условиями территории, площадью лесных ресурсов и долгосрочными целями развития государства. Важную роль в защите, охране и восстановлении лесных ресурсов мира играют обмен данными о состоянии лесов и международное сотрудничество в области охраны окружающей среды.

Переход на использование технологии ДЗЗ при мониторинге земель лесного фонда Вьетнама позволяет своевременно обнаруживать лесные пожары, места незаконных главных рубок, оценивать санитарное состояние древостоев, исследовать малоосвоенные и труднодоступные ресурсы, выявлять места и степень загрязнения лесного фонда и планировать природоохранные мероприятия. Следовательно, ДЗЗ является важным шагом для повышения эффективности, точности и устойчивости природных экосистем при их защите, охране, восстановлении и управлении.

### **1.3 Выводы по главе 1**

По результатам анализа литературных источников можно сделать следующие выводы:

1. Вьетнам – многолесная страна, почти 42,2% территории покрыто тропическими лесами. Для управления, оценки состояния и прогноза лесных ресурсов проводят мониторинг земель лесного фонда. Мониторинг ведется традиционным полевым наземным методом, используя при этом несколько этапов: подготовительный, полевые обследования с применением ручных инструментов и приборов, обработка и анализ полученных данных и разработка картографических материалов и документов.

На примере трех провинций Вьетнама, Тхань Хоа, Кон Тум и Донг Най, расположенных в различных природных условиях проанализированы недостатки мониторинга земель лесного фонда полевым наземным способом и выявлены недостатки такой технологии инвентаризации лесных ресурсов. Мониторинг земель лесного фонда с применением традиционных глазомерно-измерительных методов играет важную роль в управлении, охране, развитии и сохранении лесных ресурсов страны. Однако, для инвентаризации земель лесного фонда с такой большой площадью требуются значительные людские ресурсы с профессиональной подготовкой. Их во Вьетнаме недостаточно. Полученные данные при наземной технологии учета древостоев имеют большую погрешность по причине сбора их в жаркую погоду, частых сезонных дождей и сильного ветра.

Ограничивают использование этого метода работ также природные условия Вьетнама: большая площадь горного рельефа, наличие труднодоступных лесных районов и другие. Для мониторинга земель лесного фонда страны необходимо применение современных технологий, таких как дистанционное зондирование Земли и геоинформационные системы.

2. В других странах (Австралия, Бразилия, КНР, США и другие) при мониторинге земель используют передовые технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационные системы (ГИС). С применением технологии ДЗЗ получают информацию о земной и водной поверхностям путем регистрации отраженной электромагнитной энергии. В качестве платформ для ДЗЗ используются современные спутники, способные отображать большие территории. При оценке данных ДЗЗ возможны 4 типа разрешения: пространственное, спектральное, временное и радиометрическое, предоставляемые в больших и малых масштабах. Интеграция данных ДЗЗ с ГИС позволяет ускорить обработку, классификацию и оценку наземного покрова. Данные ДЗЗ получают от 2 типов датчиков: активных и пассивных. Спутниковые снимки являются примером пассивного зондирования, а активные технологии применяют в лидарах и радарах. Подходящим инструментом в управлении лесными ресурсами являются также беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и беспилотные летательные средства (БЛС), которые обладают целым рядом преимуществ. При использовании этих средств возможно настраивать параметры полета в зависимости от требований мониторинга, но имеются сложности определения некоторых признаков на изображениях снимков из-за разнообразия природного ландшафта и сезона съемки. Классификация земного покрова и прогнозирование проводятся различными методами, чаще всего машины опорных векторов (SVM). С использованием данных ДЗЗ можно отслеживать динамику изменения лесопользований воздействием на экосистему природных и антропогенных факторов. Для выделения видового состава растений и их биомассы (запаса древесины) на исследуемых землях используют различные вегетационные индексы (NDVI и другие).

Технология ДЗЗ имеет ряд преимуществ по сравнению с наземным мониторингом.

а) большая площадь наблюдений территорий от нескольких сотен до тысяч квадратных километров. За одно сканирование охватываются разные уголья, что позволяет изучать множество характеристик поверхности земли: растительность, рельеф и другие экологические особенности. ДЗЗ применяют во многих странах, в разных областях науки и производства.

б) достаточно высокая точность полученных данных при использовании ДЗЗ, от 0.3 до 30 м в зависимости от использования типа спутника, что позволяет классифицировать малые объекты и детали на поверхности земли. Применение спутников позволяет точно определять координаты объектов исследований.

в) экономится время и средства за счет получения данных с больших территорий и обработки их с применением программных средств и технологий. Особенно важно, что многие программы предоставляются пользователю бесплатно.

Применение беспилотных систем и ДЗЗ позволяет отслеживать пожары, охрану тропических лесов от незаконных вырубок, вести лесопатологическое обследование природных экосистем, аэрофотосъемку и оценку состояния и таксационных показателей насаждений и восстановление лесосек. Эти средства являются важным шагом повышения эффективности, точности, устойчивости и исследования природных экосистем Вьетнама, в соответствии с национальными особенностями, природными условиями и целями территориального развития. Технология применения ДЗЗ при мониторинге земель лесного фонда используется в данных авторских исследованиях.

## **ГЛАВА 2 ЗОНИРОВАНИЕ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ ПО ПРИРОДНЫМ УСЛОВИЯМ**

### **2.1. Природные факторы, влияющие на рост и развитие лесных ресурсов в экосистемах**

#### **2.1.1 Рельеф Социалистической республики Вьетнам**

Рельеф местности является важным природным фактором, оказывающим значительное влияние на рост, развитие лесных ресурсов и ведение мониторинга наземными средствами во Вьетнаме. Территория страны характеризуется уникальными особенностями рельефа и его влиянием на лесные экосистемы. Рельеф Вьетнама отличается разнообразием и включает множество типов, таких как горы, равнины, континентальные шельфы и береговые линии, что свидетельствует о длительном процессе геологического развития в условиях тропического муссонного климата. Горный рельеф занимает около 3/4 территории страны, при этом большинство гор и холмов имеют невысокие формы (85% территории располагается на высоте менее 1000 м). Высокогорные массивы, превышающие 2000 метров, составляют лишь 1% от общей площади [91]. Дельты рек занимают 1/4 площади страны, среди которых главными являются реки Красная и Меконга [91]. Пик Фансипан (в составе хребта Хоанг Лиен Сон, провинция Лаокай) является самой высокой точкой Вьетнама и достигает высоты 3147,3 м. В низменных районах дельты Меконг встречаются участки, расположенные ниже уровня моря, которые подвержены воздействию приливов и наводнений. Рельеф Вьетнама имеет общее направление наклона с северо-запада на юго-восток, а основные направления — это северо-западное - юго-восточное и дугообразное [91]. Характеристика рельефа Вьетнама показана на рисунке 2.1.



лесные ресурсы проявляется в нескольких аспектах. Прохладный климат высокогорий северо-запада и северо-востока создает благоприятные условия для развития альпийских тропических лесов, в которых произрастают ценные породы деревьев, такие как пому и сосна, а также редкие лекарственные растения, включая женьшень Нгок Линь. Состав растительности меняется с высотой над уровнем моря. Однако крутые склоны вызывают эрозию почвы в период сильных дождей, вызывая ветровалы в лесном фонде. Холмистая местность и ограниченная транспортная доступность территории создают проблемы в охране лесов от пожаров, усиливая вероятность незаконных рубок древесины. Текущие методы мониторинга лесов базируются на традиционных наземных подходах, которые отличаются высокой стоимостью работ и низкой эффективностью работ.

Регионы Северо-Центральное побережье, Южно-Центральное побережье и Центральное нагорье Вьетнама простираются от 16° северной широты до 20° северной широты. Эти регионы характеризуются узким и вытянутым рельефом, где вдоль западной части проходит хребет Чыонгшон [15]. Этот регион включает высокие горы, среднегорья и узкие прибрежные равнины. Прибрежные районы, хотя и низменные и плоские, уязвимы к штормовым нагонам и сильным ветрам. Рельеф влияет на состав лесных ресурсов. Высокогорный ландшафт хребта Чыонгшон способствует формированию тропических лесов с богатым разнообразием древесных пород. Здесь встречаются ценные породы как железное и красное дерево. Прибрежные равнины, особенно в провинциях Куанг Бинь и Тхуа Тхиен Хюэ, служат местом обитания мангровых лесов, которые играют важную роль в защите земель береговой линии от эрозии и приливов. Однако эти регионы подвергаются воздействию экстремальных природных явлений, таких как ураганы и наводнения, которые приводят к эрозии почвы, подтоплению лесных массивов, усыханию и замедлению роста деревьев. Традиционные методы мониторинга, основанные на ручных полевых обследованиях, остаются основным инструментом контроля за состоянием лесов, что снижает эффективность мер по защите, охране и восстановлению лесных ресурсов. Необходимы современные технологии и подходы для улучшения управления лесными ресурсами регионов.

Регионы Южно-западный, Южно-восточный и дельта Меконг Вьетнама характеризуются в основном низменным и равнинным рельефом, включая бассейны рек Сай Гон и Донг Най. Плоский рельеф и тропический климат способствуют развитию тропических лесов, из которых формируют национальные парки с высоким разнообразием видов, например, национальный парк Нам-Кат-Тьен. Кроме того, регионы выделяются наличием обширной мангровой экосистемой, которая играет ключевую роль в защите береговых земель от эрозии, поддержании разнообразия видов и развитии любительского рыболовства. Примером является мангровый лес Кан Зё, который также вносит значительный вклад в регулирование климата и поддержание внешней среды регионов. Однако эти регионы сталкиваются с проблемами, связанными с наводнениями, которые часто происходят в дельте Меконг из-за приливов и сезонного паводка. Эти явления негативно сказываются на устойчивом развитии лесных экосистем, вызывая повреждения и смену растительных биогеоценозов и сокращение их разнообразия. Для сохранения лесных ресурсов регионов требуется реализация мер, направленных на борьбу с последствиями наводнений и эффективное управление природными экосистемами [98].

### **2.1.2 Климат Социалистической республики Вьетнам**

Климат играет важную роль в росте и развитии лесных экосистем, включая такие факторы, как солнечная энергия, температура воздуха, количество выпавших осадки и продолжительность вегетационного периода.

*Солнечная энергия* является ключевым источником фотосинтеза — процесса, в ходе которого растения преобразуют световую энергию в химическую, обеспечивая себя органическими веществами и энергией, необходимой для их роста и развития. Процесс фотосинтеза поддерживает структуру и функционирование лесных экосистем. Помимо этого, солнечная энергия обеспечивает биологические циклы развития растительности, включая движение воды, репродуктивные процессы и рост растений. Энергия солнца также нагревает поверхность земли, стимулируя испарение воды из почвы и

листьев, что способствует поддержанию водного режима и равномерному распределению влаги в частях растений. Однако, солнечная радиация влияет на влажность лесных земель, повышая риск потери влаги из почвы и создавая условия для засухи в сухой сезон. Регулируя температуру в лесных массивах, солнечное излучение способствует поддержанию стабильных условий обитания для множества видов флоры и фауны. Кроме того, количество получаемой солнечной энергии влияет на структуру леса (простые и сложные древостои), определяя рост, развитие и продуктивность различных насаждений. В рамках исследований разработана программа для ЭВМ по вычислению солнечной радиации с учетом широты местности [18]. Характеристика солнечной радиации Вьетнама приведена на рисунке 2.2.

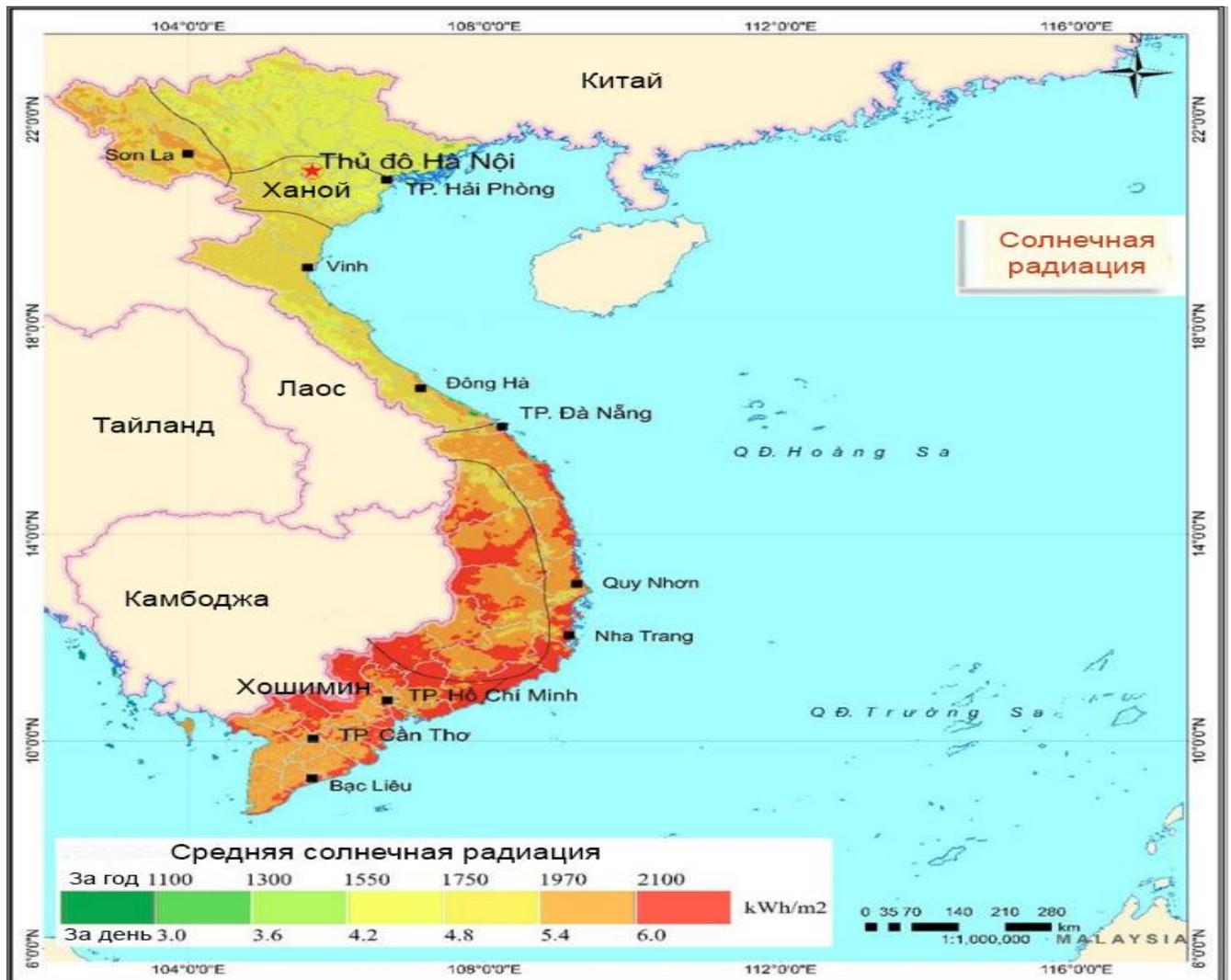


Рисунок 2.2 – Средняя солнечная радиация Вьетнама [82]

*Температура* оказывает прямое влияние на процессы фотосинтеза и рост деревьев. Умеренное повышение температуры может ускорить преобразование световой энергии в органические вещества, способствуя более активному росту растений, однако чрезмерное повышение температуры приводит к тепловому стрессу, который снижает способность деревьев к развитию. Пределы температурной толерантности различны для каждого вида деревьев и кустарников, что делает их распределение чувствительным к климатическим изменениям. Изменение климата, вызывающее колебания уровня и распределения температуры, существенно влияет на пространственное распределение лесов, изменяя в них состав как растительных, так и животных сообществ. Среднегодовая температура Вьетнама приведена на рисунке 2.3.

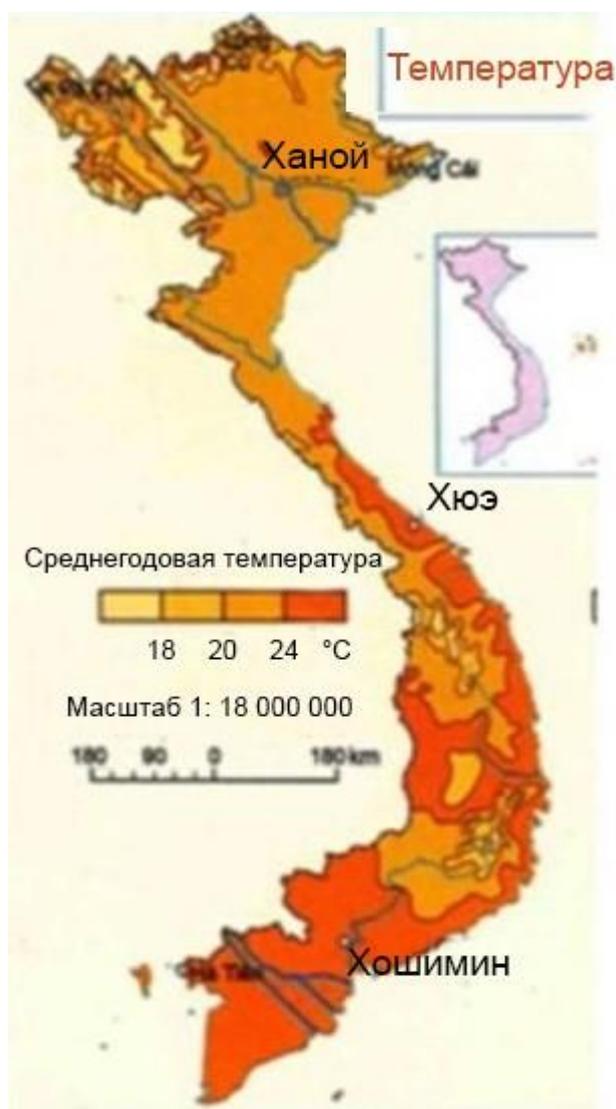


Рисунок 2.3 – Среднегодовая температура Вьетнама [52]



*Продолжительность вегетационного периода* так же оказывает значительное влияние на разнообразие видов и продуктивность лесных экосистем. Одни виды растений адаптируются к активному росту, развитию и размножению только в дождливый сезон и длительный вегетационный период, тогда как другие породы способны выживать в этих условиях, но успешно развиваться лишь в условиях сухого сезона и короткого периода вегетации. Сезонные изменения по продолжительности вегетационного периода существенно влияют на формирование состава, продуктивность и развитие природных экосистем, включая характерные виды напочвенного покрова. Так, некоторые виды деревьев, включая крупные древесные породы: *Erythrophleumfordii*, *Dalbergiacochinchinensis*; долгосрочные сельскохозяйственные культуры: *Coffea*, *Pipernigrum* во Вьетнаме цветут и плодоносят именно в длительный вегетационный период, когда солнечная энергия способствует цветению и созреванию семян. Другие растения: мелкие древесные породы и деревья с коротким циклом (*acacia*, *eucalyptus*, *manglietiaconifera*); краткосрочные сельскохозяйственные культуры (*oryzasativa*, *zeamays*) развивают свои репродуктивные органы в сухой сезон с коротким вегетационным периодом, эффективно используя солнечную энергию для скорейшего созревания плодов и их дальнейшего распространения. Такие колебания продолжительности вегетационного периода и климатических условий обеспечивают адаптацию растительности к внешней среде, что, в свою очередь, поддерживает разнообразие видов и устойчивость лесной экосистемы к внешним условиям. Изменения климатических условий на территории Вьетнама, земли лесного фонда которого располагаются с севера на юг на 1500 км, влияют на динамику площади лесов, структуру насаждений, оценочные и другие показатели древостоев. По этому понимание воздействия вышеназванных факторов по лесные экосистемы важно для разработки мониторинга состояния земель и для разработки мероприятий по защите, охране и управлению лесами во Вьетнаме.

По результатам исследования можно заключить, что климатические факторы играют решающую роль в росте и развитии лесных экосистем, что

необходимо учитывать при планирование и зонирование лесных земель страны. В данном исследовании применяется подход, основанный на расчете климатического индекса, предложенного шведским ученым Х. Патерсоном.

### **2.1.3 Почвы Социалистической республики Вьетнам**

Почва является важнейшим фактором, определяющим рост, развитие и продуктивность лесных экосистем во Вьетнаме, благодаря ее разнообразным физико-химическим характеристикам. Во Вьетнаме насчитывается более 7 основных типов почв, включая фералитовые, аллювиальные, сероземы, песчаные прибрежные почвы, кислые сульфатные (феновые), солончаки и гумусовые почвы горных районов. Эти различия определяют способность почвы удерживать влагу, снабжать растения питательными веществами и обеспечивать эффективный водоотвод [15] при обильных дождях. Три четверти территории страны занимают горные почвы, главным образом в низкогорных районах. Фералитовые почвы составляют около 65% общей площади, распространены в холмистой и горной местности. Почвы Вьетнама имеет разное плодородие в зависимости от регионов. Аллювиальные почвы в дельтах рек (Красной реки и Меконг) имеют высокое плодородие, что делает их пригодными для сельского хозяйства. Фералитовые и другие горные почвы бедны гумусом и подвержены эрозии. Тропический муссонный климат оказывает влияние на характеристики почв Вьетнама. Влажный климат способствует интенсивному выветриванию, образованию глубокого почвенного слоя, богатого глиной и оксидами железа, что придает почвам характерный красно-желтый цвет. Кроме того, распределение почв Вьетнама напрямую связано с рельефом. Разные типы почв сосредоточены в характерных зонах: аллювиальные почвы — в равнинах, фералитовые — в горах, солончаки и кислые почвы — в прибрежных районах [98]. Ниже приведена таблица 2.1 с характеристиками типов почв Вьетнама.

Таблица 2.1 – Характеристики основных типов почв Вьетнама

Тип почвы	Доля площади	Характеристики	Основное распространение	Основное использование
Фералитовые почвы красно-желтого цвета	55%	Кислые, бедные гумусом, с высоким содержанием оксидов железа и алюминия, склонны к эрозии.	Горные районы Северо-восточного и Северо-западного Вьетнама, регионы Центрального нагорья и Южно-восточного страны.	Выращивание чая, кофе, каучука).
Почвы аллювиальные	14%	Рыхлые, плодородные, богаты гумусом и питательными веществами, легко поддаются обработке.	Дельты рек Красной и Меконг, древние аллювиальные равнины Южно-восточного Вьетнама.	Выращивание риса, овощей, фруктов.
Гумусовые почвы горных районов	8%	Богатые гумусом, очень плодородные, формируются под лесами умеренного или субтропического пояса.	Высокогорные районы Западного Бакбо, Северный Чыонгшон.	Лесоводство, охрана горных экосистем.
Сероземы (обесцвеченные почвы)	7%	Бедные гумусом, кислые, с плохой структурой, подвержены эрозии.	Юго-Восток, Центральное нагорье, частично прибрежные равнины Центрального Вьетнама.	Лесоводство, выращивание технических культур.
Кислые сульфатные почвы (феновые)	4%	Высокое содержание соединений железа и серы, кислые, требуют улучшения для сельскохозяйственного использования.	Дельта Меконг реки, прибрежные районы Южного страны.	Улучшение для выращивания риса и устойчивых культур.
Фералитовые почвы на базальте	4%	Рыхлые, красно-коричневые, богаты питательными веществами, очень плодородные.	Районы Южно-восточного и Центрального нагорья Вьетнама.	Выращивание кофе, каучука, перца.
Фералитовые почвы на известняке	3%	Богатые гумусом, хорошо дренируемые, но подвержены эрозии.	Известняковые районы Южно-восточного Вьетнама.	Лесоводство, охрана экосистем.
Засоленные почвы	3%	С высоким содержанием солей, затопляемые приливами, с плохим дренажем.	Дельта реки Меконг (Бак Льеу, Ка Мау).	Аквакультура, улучшение для выращивания риса.
Песчаные почвы прибрежные	2%	Бедные питательными веществами, быстро пропускают воду, плохо удерживают влагу.	Прибрежные районы Центрального Вьетнама.	Выращивание растений для защиты побережья от ветров.

На территории Социалистической республики Вьетнама встречаются разные типы почв. Из таблицы 2.1 видно, что ферралитовые почвы важны для выращивания технических культур. Ферралитовые почвы красно-желтого цвета занимают среди них наибольшую площадь - 55%, что эквивалентно 18 млн. га, за ними следуют аллювиальные почвы с 5 мил. га (14%). Гумусовые почвы горных районов и сероземы (обесцвеченные почвы) составляют 8% и 7%, соответственно 3 млн и 2,5 млн га. Остальные типы почв занимают небольшую площадь – менее 4%. Характеристика распространения основных типов почв Вьетнама приведена на рисунке 2.5.

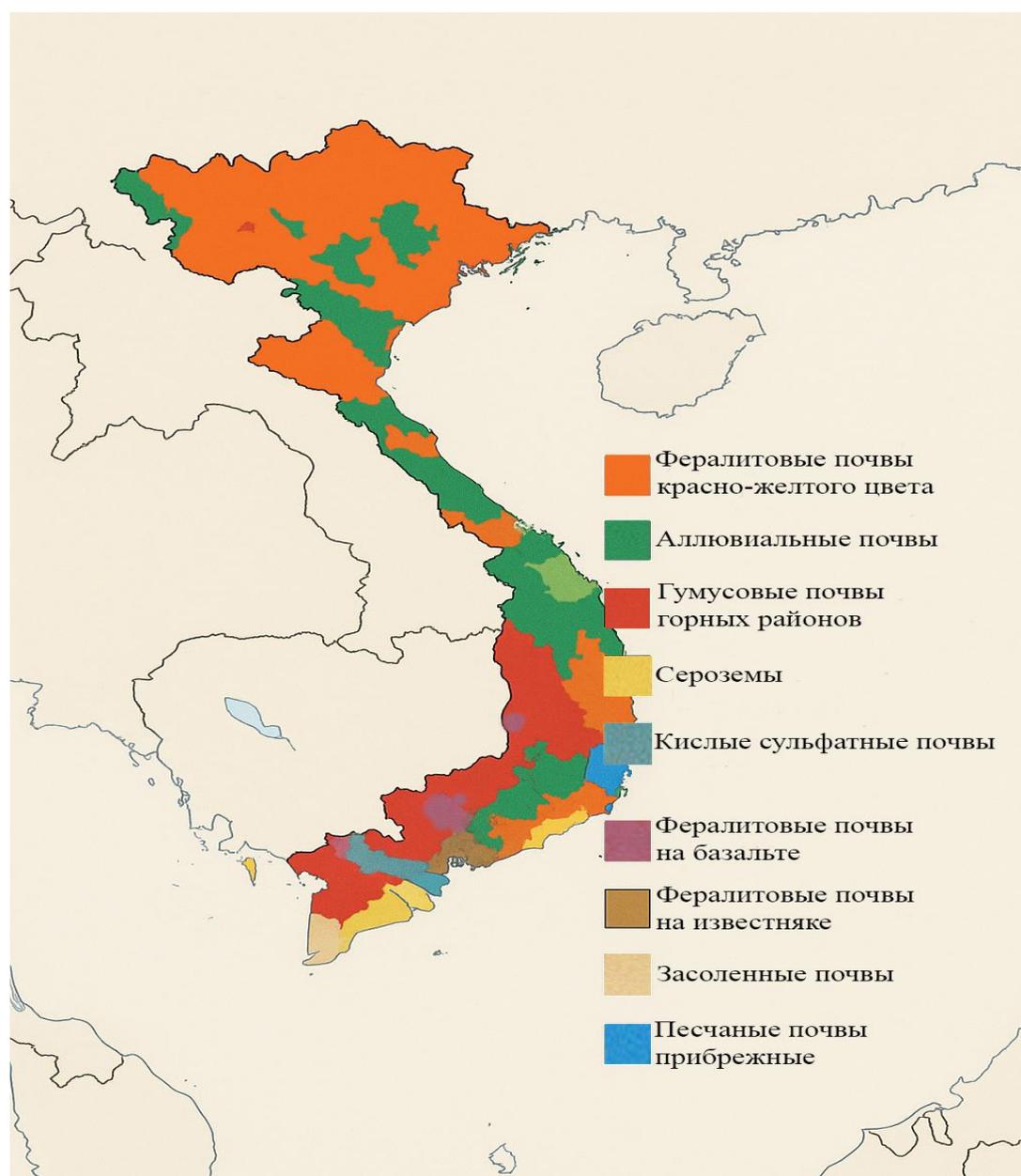


Рисунок 2.5 – Основные типы почв Вьетнама и их распространение

По рисунку 2.5 видно, что в северной зоне преобладают фералитовые почвы красно-желтого цвета, в центральной-аллювиальные почвы и в южной зоне горных районов- гумусовые почвы. Фералитовые почвы красно-желтого цвета являются кислыми, бедные гумусом, с высоким содержанием оксидов железа и алюминия, склонны к эрозии. Аллювиальные почвы характеризуются рыхлостью, плодородностью, богаты гумусом и питательными веществами, легко поддаются сельскохозяйственной обработке. Гумусовые почвы содержат значительную часть гумуса, поэтому плодородные, формируются под широколиственными и смешанными лесами.

Аллювиальные почвы играют ключевую роль в сельском хозяйстве, особенно в производстве риса. Почвы, такие как засоленные и феновые, требуют улучшения для повышения их продуктивности.

Почва играет ключевую роль в росте и развитии лесов. Плодородные почвы обеспечивают необходимыми питательными веществами для быстрого роста деревьев, создавая условия для формирования разнообразной растительности. Малоплодородные и кислые почвы (например, кислые серозёмы) требуют улучшения или защиты, чтобы обеспечить устойчивое развитие лесов. Лесные почвы с хорошей водоудерживающей способностью обеспечивают достаточную влажность для деревьев, особенно в засушливый сезон. В районах с хорошо дренируемыми почвами, такими как песчаные почвы прибрежных зон, обычно высаживаются мангровые леса или засухоустойчивые деревья (например, казуарина, авиценния). В горах с крутыми склонами почвы подвержены эрозии, что снижает их плодородие и способность поддерживать интенсивный рост деревьев. Меры по созданию зон защитных лесов и ветроломных насаждений помогают улучшить эту ситуацию. Почва также играет важную роль в естественном восстановлении лесных угодий, создавая благоприятную среду для прорастания семян и роста сеянцев и молодых растений [30]. В районах с деградированными и бедными гумусом почвами восстановление лесной экосистемы занимает длительное время и требует больших финансовых средств. Улучшение качества почв и искусственная посадка молодых растений в

соответствии с особенностями территории каждого региона являются ключевыми факторами для устойчивого развития лесного хозяйства во Вьетнаме. В настоящее время традиционные наземные методы мониторинга лесов применяются для поддержки мероприятий по лесовосстановлению с учетом качества почв. Однако такие методы требуют значительных затрат и времени, а их эффективность остаётся недостаточной. Поэтому необходимо внедрение новых высокотехнологичных методов мониторинга, чтобы повысить эффективность и снизить затраты на лесовосстановительные работы [31].

## **2.2 Зонирование лесных земель по климатическим условиям**

Классификация лесных экосистем по географическим условиям и климату имеет важное значение для мониторинга земель лесного фонда с целью проведения оценки обстановки, прогноза изменений и конкретных мер по защите и развитию лесов, характерных для разных регионов Вьетнама [16]. Характеристики географических условий, климата, рельефа и почвы приводят к разнообразию лесорастительных условий наземного покрова страны. Проводились исследования по обобщению и зонированию лесных земель Вьетнама в зависимости от климата каждой провинции, однако из-за сложной структуры рельефа и протяженности территории Вьетнама в широтном направлении через различные климатические зоны, классификация лесорастительных зон так и не определена в целом по стране.

Для выделения зон Вьетнама по климатическим условиям необходимы сведения о географическом положении, рельефе и климате страны. Территория Вьетнама представлена в виде латинской буквы "S", расположена в северных широтах от 8°27' до 23°23' и имеет протяженность 1650 км в северо-южном направлении. Вьетнам находится в тропической зоне, которая характеризуется высокой годовой температурой и влажностью. Береговая линия Вьетнама составляет 3260 км. Южно-китайское море, омывающее восточное побережье страны, определяет влажный муссонный тропический климат, который существенно меняется от севера к югу и в провинциях, расположенных в

различных зонах Вьетнама.

Сложные природные условия Вьетнама вызывают трудности для исследования, управления, охраны и защиты разнообразных по составу и оценочным показателям лесных ресурсов [100]. Тем не менее, ученые страны проводят исследования по мониторингу земельных и лесных ресурсов и выделению климатических зон на 1650-километровой протяженности Вьетнама в широтном направлении. В одном из исследований Нгуен Чонг Хиеу и Нгуен Дык Нгы (2017) под названием «Изучение субклиматических зон Вьетнама», авторы делят территорию страны на 46 субклиматических зон и характеризуют каждую зону [93]. В работе Данг Нгок Куок Хынг (2010) под названием «Исследование изменений растительного покрова в национальном парке Бач Ма, провинция Тхыатхиен Хюэ» проанализировали распространение растительного покрова национальном парке Бач Ма с использованием дистанционного зондирования и ГИС [33]. Авторы статьи Nong Van Duy, Tran Thai Vinh, Vu Kim Cong в работе «Исследование разнообразия растительных ресурсов в Центральном Нагорье Вьетнама» (2020) представляют типологию лесной растительности Центрального нагорья Вьетнама на основе дешифрирования спутниковых снимков и полевых наблюдений [94].

Однако, приведенные выше исследования ученых сосредоточены на изучении определенной части территории страны и не позволяют полноценно оценить влияние климатических факторов на состояние и оценочные показатели всего лесного ландшафта Вьетнама. Для выделения климатических зон шведский биоклиматолог Х. Паттерсон предлагает использовать индекс, который включает основные климатические параметры, влияющие на формирование состава и продуктивности лесов: температуру воздуха, её годовые амплитуды, количество осадков, продолжительность вегетационного периода и радиационный баланс территории [14]. Значение индекса Х. Паттерсона рассчитывается по формуле (2.1):

$$K = \frac{T_{г} \times O_{с} \times ПВ \times E}{T \times 12 \times 100}, \quad (2.1)$$

где K – климатический индекс Х. Паттерсона,

$T_t$  – средняя температура самого теплого месяца, °C,

$O_c$  – годовое количество осадков, мм,

$PВ$  – продолжительность вегетационного периода, мес.,

$E$  – радиационный коэффициент на суммарное испарение, %,

$T$  – разность между средней температурой самого теплого и самого холодного месяцев, °C.

MdSiddiqur Rahman (2015) рекомендовал шкалу значений индекса Х.Патерсона для выделения климатических зон (таблица 2.2) [104]. По этой шкале выбраны 9 регионов по три наблюдения в северной, центральной и южной частях страны (рисунок 2.6). Параметры этих регионов получены путем наблюдения за климатическими условиями в Ханойском государственном университете и учеными института климатологической гидрометеорологии Вьетнама [13] и приведены в таблице 2.3.

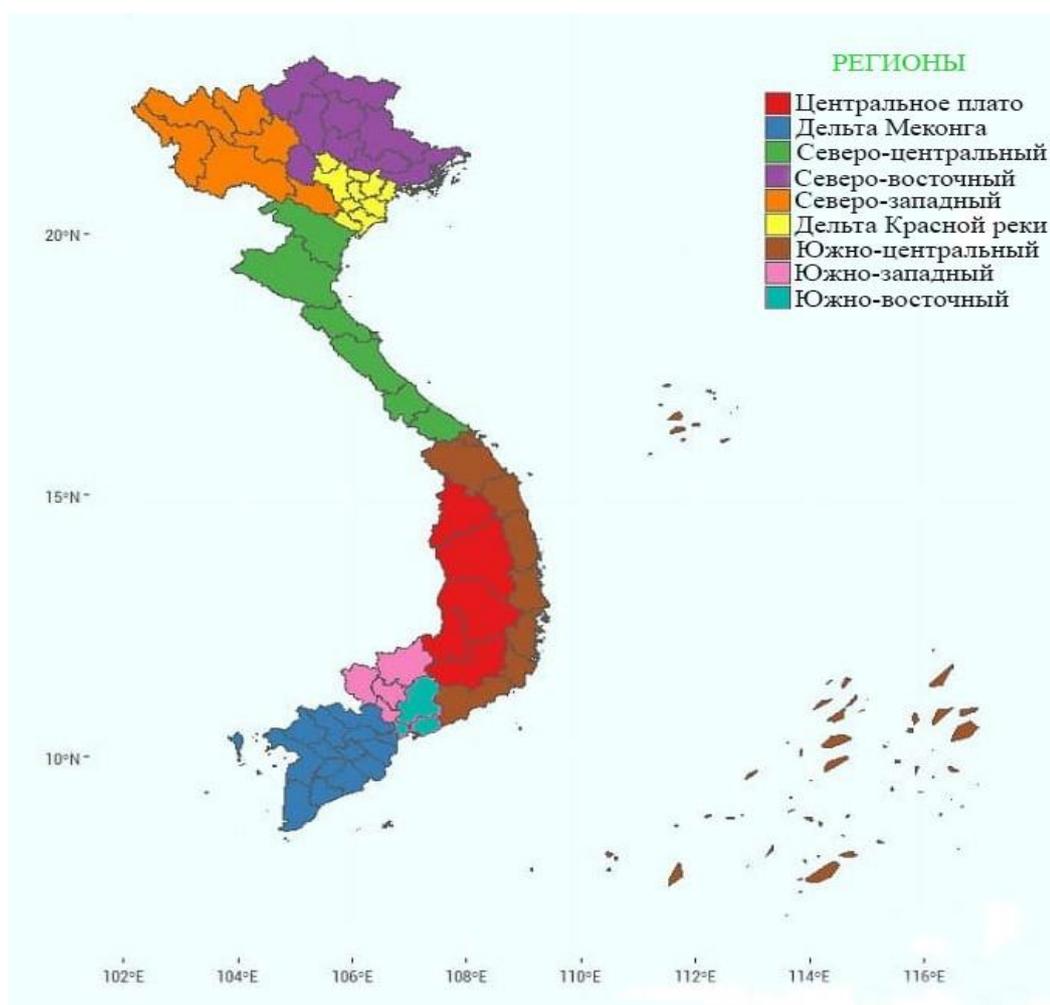


Рисунок 2.6 – Регионы наблюдения за климат Вьетнама

Таблица 2.2 – Значения индекса Х.Патерсона по климатическим зонам

Климатическая зона	Значения индекса Х.Патерсона
Муссонная тропическая зона	1700-2000
Средняя тропическая зона	2000-3500
Тропическая зона	> 3500

Таблица 2.3 – Климатические параметры регионов наблюдения Вьетнама

Части страны	Регионы наблюдения	Температура холодных и теплых месяцев, °С		Т, °С	Ос, мм	ПВ, мес.	Е, %
		Тх	Тт				
Северная	Северо-западный	13	27	14	1600	12	57.5
	Северо-восточный	12	28	16	1700	12	59
	Дельта Красной реки	15	29	14	1600	12	60
Центральная	Северо-центральный	16.5	30	13.5	1700	12	61.5
	Южно-центральный	20	30	10	1500	12	62
	Центральное плато	19	28	9	1700	12	63.5
Южная	Южно-западный	23	30	7	1800	12	64
	Южно-восточный	21	29	8	1600	12	65
	Дельта Меконга	25	31	6	2000	12	66

По шкале значений индекса Х.Патерсона (таблица 2.2) и результатам трех наблюдений за погодой в каждой части страны (таблица 2.3) составлена таблица 2.4, показывающая климатические параметры для выделения зон.

Таблица 2.4 – Климатические параметры выбранных точек измерений

Точки измерения	Средняя температура холодных и теплых месяцев, °С		Т, °С	Ос, мм	ПВ, мес.	Е, %
	Тх	Тт				
Северная точка Вьетнама	13	27	14	1548	12	58.8
Северная точка центральной зоны	15	30	15	1661	12	60.2
Северная точка южной зоны	22	32	10	1790	12	61.1
Южная точка Вьетнама	26	35	9	1992	12	63.9

По выбранным четырем точкам измерений климатических факторов на северной, центральной и южной частях Вьетнама рассчитаны значения индекса Х. Патерсона, по которым установлены границы климатических зон.

Наблюдается увеличение значений климатических параметров с севера на юг Вьетнама, что, безусловно, влияет на формирование и продуктивность лесных насаждений. По расчетным значениям параметров определены индексы Х.

Патерсона и выделены три климатические зоны. Установлены границы зон по 2 показателям: индексу Х. Патерсона ( $K=2000$  и  $K=3500$ ) и широте местности данных значений климата ( $\varphi_1 = 18^\circ33'00''$ ;  $\varphi_2 = 13^\circ55'00''$ ). Полученные результаты расчетов приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Рассчитанные индексы Х.Патерсона в разных точках страны

<b>Точки измерения</b>	<b>Значения индекса Х. Патерсона</b>	<b>Значения географической широты</b>
Северная точка	1755	23°23'00"
Северная точка центральной зоны	2000	18°33'00"
Северная точка южной зоны	3500	13°55'00"
Южная точка	4950	08°34'00"

Полученные данные свидетельствуют о существенном различии климатических данных при движении с севера на юг страны. Северная часть Вьетнама характеризуется муссонным тропическим климатом и подвержена воздействию северо-восточного ветра, который зимой приносит прохладу, а летом из-за отсутствия холодных масс достаточно жарко, что приводит к большой разнице температуры в течение года. Южная часть страны располагается ближе к экватору, меньше подвержена воздействию муссона и характеризуется тропическим, теплым климатом в течение всего года [1]. Вегетационный период разделяется на два сезона: дождливый и сухой. Дождливый сезон продолжается с мая по октябрь, а сухой с ноября по апрель. Кроме того, климат центральной части Вьетнама подвержен влиянию Южно-Китайского моря. Скорость северо-восточного ветра ослабевает из-за горного рельефа территории.

Разработана тематическая карта зонирования (рисунок 2.7), которая в дальнейшем используется для мониторинга земель лесного фонда с применением методов дистанционного зондирования. Карта создана в программе Arcgis, где цвета представляют разные климатические зоны [20].

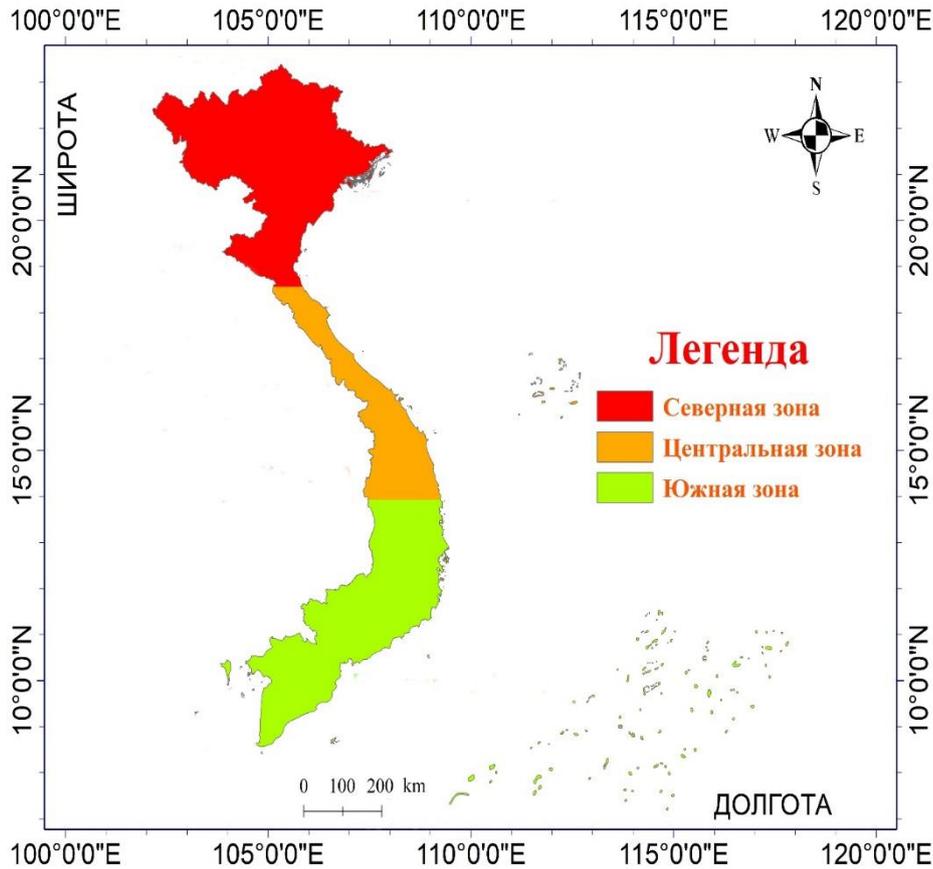


Рисунок 2.7 – Карта климатического зонирования земель лесного фонда Вьетнама и их границы

Сведения о климатических зонах приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Сведения о климатических зонах Вьетнама

Зоны	Значения индекса Х. Патерсона	Широта зоны	Площадь, км <sup>2</sup>
Северная	1755-2000	18°33'00"-23°23'00"	109.942
Центральная	2000-3500	13°55'00"-18°33'00"	151.234
Южная	3500-4950	08°34'00"-13°55'00"	101.271

Краткая характеристика лесов в этих провинциях представлена в таблице 2.7. Из таблицы 2.7 видно, что выбраны лесные объекты, расположенные в различных климатических условиях и существенно различаются по типам лесорастительных условий, составу и продуктивности древостоев. Наиболее благоприятные условия для роста и формирования насаждений отмечены в южной зоне. Результаты климатического зонирования территории Вьетнама по индексу Х. Патерсона полностью соответствуют климатическим условиям страны. Каждая выделенная зона характеризуется определенным видовым составом древесных пород, что особенно актуально для проведения мониторинга

земель лесного фонда методом дистанционного зондирования Земли [65].

Таблица 2.7 – Типичные породы лесов провинций-аналогов лесорастительных зон Вьетнама

Лесорастительная зона	Провинции-аналоги	Древесная порода	
		Русское название	Латинское название
Северная (муссонная тропическая зона)	Тхань Хоа	Мадука длиннолистная	<i>Madhucalongifolia</i>
		Птерокарпус	<i>Pterocarpus</i>
		Диптерокарпус obtusifolius	<i>Dipterocarpusobtusifolius</i>
		Кипарис гималайский	<i>Cupressustorulosa</i>
		Бамбук	<i>Bambuseae</i>
Центральная (средняя тропическая зона)	Кон Тум	Магнолия белая	<i>Magnoliaalba</i>
		Ирвингия	<i>Irvingia</i>
		Афзелиясилокарповая	<i>Afzeliaxylocarpa</i>
		Сосна Кремпфа	<i>Pinuskrempfii</i>
Южная (тропическая зона)	Донг Най	Аглайя	<i>Aglaia</i>
		Мадука длиннолистная	<i>Madhucalongifolia</i>
		Эритрофлеум	<i>Erythrophleum</i>
		Мелия ацедарах	<i>Meliaazedarach</i>
		Кипарис гималайский	<i>Cupressustorulosa</i>
		Кедр гималайский	<i>Cedrusdeodara</i>

### 2.3 Выводы по главе 2

По результатам зонирования территорий Вьетнама по климатическим факторам можно сделать следующие выводы:

1. Зонирование территории Социалистической республики Вьетнам по климатическим условиям является фундаментальной задачей, которая играет важную роль в управлении, охране, защите и восстановлении лесных ресурсов. Исследования показали, что природные факторы, такие как рельеф, и климат, тесно взаимосвязаны и оказывают существенное влияние на развитие лесных экосистем. Расчет индекса Х. Патерсона не включает рельеф местности и почву, хотя эти природные факторы оказывают влияние на динамику и формирование лесных экосистем. Рельеф влияет на циркуляцию воздушных потоков, температурный режим и количество осадков. Почвенные характеристики, включая плодородие, структуру и водоудерживающую способность, служат физической и питательной основой, обеспечивающей рост наземного покрова. Именно климат является определяющим фактором, формирующим структуру, почву, породный состав и регенерационную способность лесных насаждений.

Изменения температуры, осадков, продолжительности вегетационного периода и солнечной радиации оказывают прямое влияние на почву, рост и развитие насаждений. Зонирование территории Вьетнама на основе климатических условий имеет высокую практическую значимость. Оно создает предпосылки для разработки стратегий управления лесами, адаптированных к особенностям каждого региона, оптимизации потенциала лесных экосистем и повышения эффективности адаптации к изменению климата. Результаты такого подхода способствуют не только сохранению природных ресурсов, но и устойчивому развитию, обеспечивая баланс между экономическими интересами и охраной окружающей среды.

2. Характерной особенностью территории Вьетнама является её узкая форма и значительная протяжённость в северо-южном направлении. Это обуславливает существенные изменения климата и растительного покрова лесов от севера к югу. Для оценки роли климата на продуктивность насаждений использован индекс шведского биоклиматолога Х. Патерсона, который рассчитан на основе ключевых климатических параметров, которые оказывают прямое влияние на состав и продуктивность лесов, включая температуру, количество осадков, продолжительность вегетационного периода и радиационный баланс территории. Применение данного климатического индекса позволяет разделить территорию Вьетнама на климатические зоны, отражающие природные условия страны. Каждая зона имеет характерный породный состав, особенности растительных сообществ и оценочные (таксационные) показатели древостоев. Данный подход дает возможность правительству страны и главам провинций применять современные технологии при мониторинге и управлении лесными ресурсами, оптимально учитывая особенности климатических зон Вьетнама. Это позволяет улучшить качество инвентаризационных работ, повысить эффективность мероприятий по защите, охране и восстановлению лесов, а также снизить трудовые и денежные затраты.

## ГЛАВА 3 МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС- ТЕХНОЛОГИЙ

### 3.1 Состояние земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам глазомерно-измерительным методом

Для мониторинга и оценки трансформации земель лесного фонда Вьетнама необходимо разобраться с терминами.

*Широколиственные леса* представляют собой насаждения, в которых древесные породы с широкими листьями составляют более 75% от общего числа деревьев на участке. Широколиственные леса включают преимущественно древесные породы с тонкими, большими листьями, способствующими интенсификации процесса фотосинтеза. Широколиственные леса распространены во всех географических зонах Вьетнама из-за влажного климата и обильных осадков [35]. В широколиственных лесах Вьетнама произрастают древесные породы: *Chukrasiatubularis* (Чукрасия табличная), *Erythrophleumfordii* (Кассия Форда), *Dalbergiacochinchinensis* (Далбергиякокхинхинская), *Cinnamomumcamphora* (Камфорное дерево).

*Смешанные леса* представляют собой древостои, характеризующиеся сочетанием лиственных и хвойных пород, при этом доля каждой породы колеблется от 25% до 75% от общего числа деревьев. Такое сочетание породного состава обеспечивает экологическое разнообразие и повышает способность древостоя адаптироваться к различным климатическим и почвенным условиям. Такие по составу леса распространены на лесных землях Вьетнама в горных условиях, где лесорастительные условия благоприятны для произрастания хвойных и лиственных пород. Смешанные леса обладают высоким уровнем видового разнообразия, что способствует повышению устойчивости к вредителям, болезням и изменению климата. Они играют важную роль в защите почвы и водных ресурсов от неблагоприятных воздействий [123].

*Сомкнутость полога насаждения*– заполнение воздушного пространства кронами деревьев, определяемая отношением площади проекций крон к площади земельного участка. Показатель сомкнутости древостоев коррелирует с вегетационным индексом NDVI. Более насыщенные зеленые цвета соответствуют более высоким значениям сомкнутости древостоя. Полнота и сомкнутость измеряются в относительных единицах от 0,2 до 1,0 единицы.

*Относительная полнота насаждения*– плотность стояния деревьев в насаждении, характеризующая степень использования ими пространства. При наземной инвентаризации земель лесного фонда полнота устанавливается как отношение площади поперечного сечения стволов на высоте 1,3м к стандартному значению их по таблице хода роста насаждений. При использовании результатов ДЗЗ полноту устанавливает по значению сомкнутости полога с учетом значений NDVI.

*Запас*- это продуктивность древостоя, возможности и ограничения использования лесных ресурсов для заготовки древесины, а также формирует базу для планирования объема лесозаготовок, устойчивого управления лесами и улучшения внешней среды путем депонирования углерода

Согласно решению Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама № 2860 /QĐ-BNN-TCLN от 27.07.2022 года, общая площадь лесов страны составляет 14745201 га. Из них площадь естественных лесов составляет 10171757, а площадь искусственно созданных лесов — 4573444 га [118].

В настоящее время полевая оценка текущего состояния лесов на местности является важным методом мониторинга земель лесного фонда во Вьетнаме. Он включает наземные проверки путем развертывания команды сотрудников и сотрудничества с экспертами в этой области [96]. Этот метод также включает прямую оценку состояния деревьев на местности, что позволяет определить вид деревьев, их возраст и плотность на единицу площади. Методы мониторинга земель лесного фонда не обновляются в полной мере и своевременно, что ограничивает возможности обнаружения изменений в лесном фонде и

оперативного реагирования на проблемы [99]. Этот метод также включает санитарную оценку состояния деревьев, видового состава насаждений, возраста, запаса, полноты и сомкнутости древостоев. Методы измерения на местности позволяют определить площадь леса, различить разные лесные участки, их функциональные структуры; зафиксировать проблемы экосистемы и окружающей среды, состояние загрязнения почвы, воды и воздуха, собрать данные о биологическом разнообразии и тенденциях развития лесных экосистем. Процедура мониторинга земель лесного фонда Вьетнама глазомерно-измерительным методом приведена на рисунке 3.1.

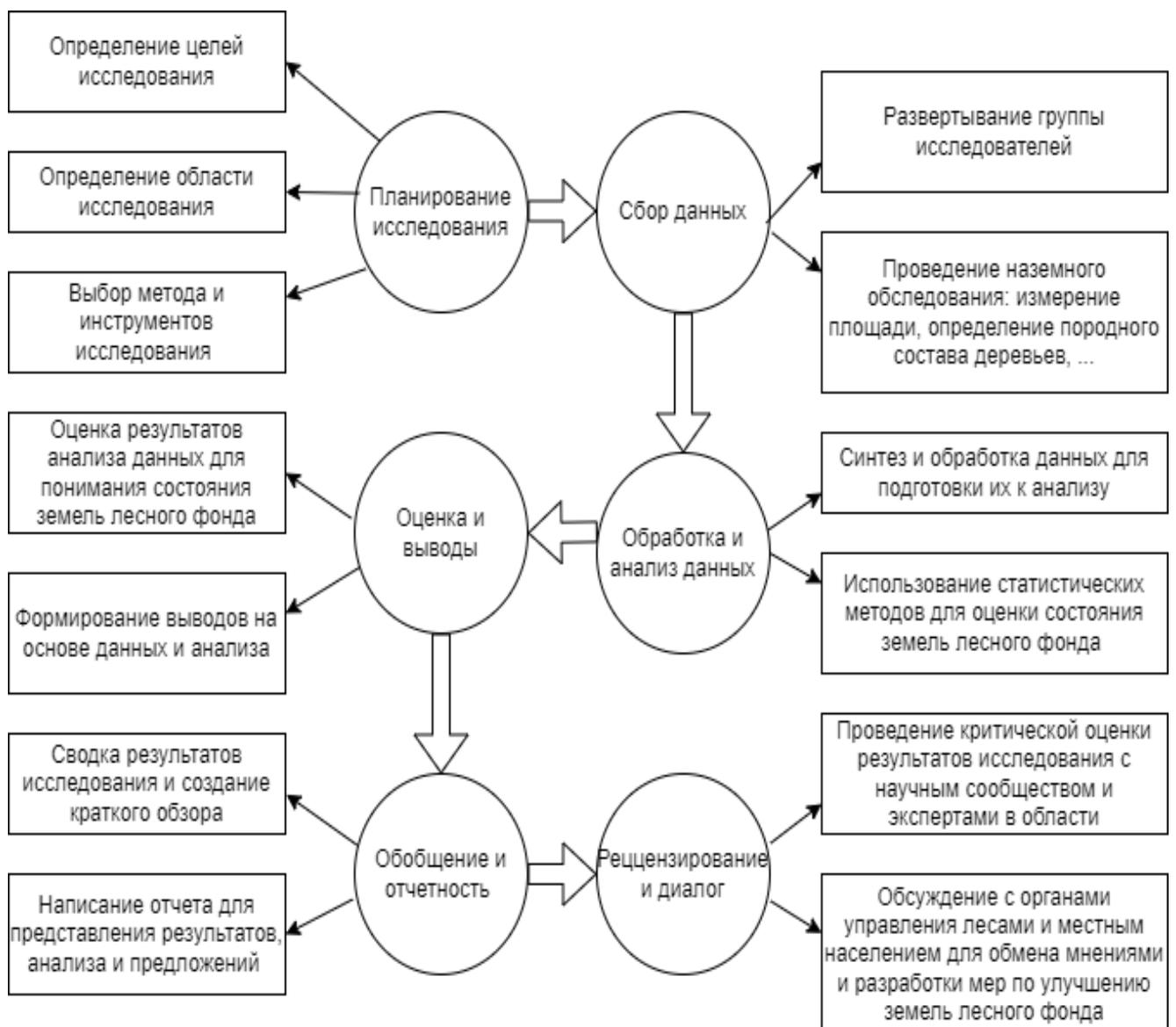


Рисунок 3.1 – Схема мониторинга земель лесного фонда Вьетнама наземным методом

Департаменты сельского хозяйства и развития сельских районов ряда провинций Вьетнама проводят инвентаризацию лесного фонда традиционным глазомерно-измерительным методом, который включает высокие трудозатраты. В данном исследовании, чтобы преодолеть сложности рельефа и природные условия, связанные с традиционным методом полевых исследований, мы предлагаем использовать дистанционное зондирование — современную и эффективную технологию, которая способствует ускорению процесса мониторинга лесных земель и снижению затрат [3, 68]. Используя данные спутниковых снимков Landsat 7, 8, 9 и Sentinel-2, оценено состояние земель лесного фонда в разных климатических зонах Вьетнама [4, 72].

## **3.2 Оценка трансформации земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам дистанционным зондированием**

### **3.2.1 Трансформация земель лесного фонда в разных климатических зонах Вьетнама**

Исследования проводились в трех зонах Вьетнама, расположенных в разных климатических условиях, которые определяют динамику и оценочные показатели насаждений.

*Северная зона* расположена в северной части Вьетнама и является одной из крупнейших в стране. Она занимает третье место по численности населения и пятое по площади [36]. Горы и холмы занимают 3/4 всей площади зоны, что создает значительный потенциал для лесного хозяйства, обеспечивая богатство лесных ресурсов. В лесах зоны произрастают ценные виды деревьев: *Chukrasia tabularis*, *Fokienia*, *Erythrophleum fordii*, *Madhucapasquieri*, *Parashoreachinensis*. Также встречаются различные виды бамбука: *Vambusoideae*, *Dendrocalamus barbatus*, *Schizostachyum aciculare*, *Vambusanutans* и другие.

*Центральная зона* расположена в центре Вьетнама на пересечении Восточной Индокитайской треугольной зоны, что делает ее важным стратегическим регионом, граничащим с Лаосом и Камбоджей. Рельеф состоит из холмов и гор, которые занимают 40% площади зоны [36]. Леса зоны богаты

разнообразием видов, включая множество редких растений, обладающих высокой экономической и медицинской ценностью: *Panaxvietnamensis*, *Fokieniahodginsii*, *Aquilariacrassna*, *Dalbergiaoliveri*, *Taxuswallichiana* и другие.

*Южная зона* находится в южной части Вьетнама. Она также играет важную роль в экономическом развитии страны: промышленность, сельское хозяйство, торговля и услуги, строительство и недвижимость, экологический туризм, энергетика и другие [9]. Эта зона обладает богатыми и разнообразными лесными ресурсами, включая особо охраняемую природную территорию (ООПТ) – национальный парк Нам Кат Тьен. Географическое положение трех климатических зон Вьетнама представлено на рисунке 2.7.

Данные исследования ДЗЗ собраны в течение 2010, 2015 и 2020 годов на землях трех зон, различающихся климатическими условиями и состоянием внешней среды. Снимки Landsat с пространственным разрешением 30 м получены из Геологической службы США (United States Geological Survey - USGS), а снимки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м предоставлены Европейским космическим агентством (European Space Agency- ESA). Из-за обширной исследуемой территории сбор данных с официальных веб-сайтов указанных организаций требует значительного времени и геоинформационных систем. Поэтому для автоматизации процесса сбора данных использован редактор кода на языке программирования JavaScript в рамках онлайн-платформы Google Earth Engine [58]. В дополнение к космоснимкам Landsat и Sentinel-2, технология дистанционного зондирования Земли также включала сбор данных цифровых моделей рельефа (ЦМР-DEM) и склонов (Slope), которые использованы как пространственные параметры при анализе изменений в классах наземного покрова и построении моделей потенциальных преобразований. Файл DEM получен из данных высот радарной топографии миссии SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) и обработан в программе ArcGIS для создания слоя Slope [131]. Кроме того, с помощью редактора кода JavaScript выполнена предварительная обработка материалов дистанционного зондирования Земли, включая состояние облачности, радиометрическую калибровку и атмосферную

коррекцию. В таблице 3.1 представлена информация об использованных космоснимках.

Таблица 3.1 – Характеристики исходных космоснимков для исследования

Год	Северная зона	Центральная зона	Южная зона	Параметры данных	Источник данных
2010	LE07_126047_20100210 LE07_126047_20100226 LE07_127046_20101031 LE07_127047_20100305 LE07_128046_20100208 LE07_128046_20101022 (T1_L2)	LE07_124049_20100212 LE07_124049_20100706 LE07_124050_20100212 LE07_124051_20100212 LE07_124051_20100316 LE07_124051_20100307 LE07_125049_20100219 (T1_L2)	LE07_124052_20100212 LE07_124052_20100316 LE07_124053_20100127 LE07_124052_20100127 (T1_L2)	Landsat 7 уровень 2, коллекция 2, ярус 1 с разрешением 30 м	Американская служба по геологии
2015	LC08_127046_20150530 LC08_127046_20150701 LC08_127047_20150122 LC08_128046_20150129 LC08_128046_20150318 LC08_128046_20150419 (T1_L2)	LC08_124049_20150306 LC08_124049_20150509 LC08_124049_20150610 LC08_124049_20151117 LC08_124050_20150306 LC08_124050_20150407 LC08_124051_20150407 LC08_125049_20150124 (T1_RT)	LC08_125053_20150124 LC08_124052_20150218 LC08_124052_20150322 LC08_125052_20150108 LC08_125052_20150124 LC08_125052_20150329 (T1_RT)	Landsat 8 уровень 2, коллекция 2, ярус 1; Landsat 8 коллекция 2, ярус 1 в реальном времени с разрешением 30 м	Американская служба по геологии
2020	20200109T033739_T48QXG 20200116T032705_T48QWG 20200225T032326_T48QWG 20200301T032759_T48QWG 20200309T033758_T48QVH 20200309T033758_T48QWH 20200515T033039_T48QWG 20200823T033101_T48QWG	LC08_124049_20200506 LC08_124049_20200623 LC08_124049_20200810 LC08_124050_20200216 LC08_124051_20200216 LC08_125049_20200106 LC08_125050_20200106 LC08_125050_20200122	20200106T032732_T48PXT 20200116T032705_T48PXT 20200121T032421_T48PXT 20200205T032530_T48PXT 20200220T033233_T48PXT 20200227T032231_T48PXT 20200227T032231_T48PYT 20201203T032317_T48PXS	Landsat 8 коллекция 2, ярус 1 в реальном времени с разрешением 30 м. Sentinel-2: мультиспектральный прибор, уровень-2A с разрешением 10 м	Американская служба по геологии; Европейское космическое агентство

Применение дистанционного зондирования и ГИС при мониторинге земель лесного фонда обеспечивает достоверную точность и оптимизирует трудовые затраты и время по сравнению с глазомерно-измерительным методом. Поэтому предлагается применять метод дистанционного зондирования и программные обеспечения Google Earth Engine, Arcgis, Qgis для мониторинга земель лесного фонда Вьетнама. Для классификации категорий наземного покрова реализовывалось три взаимосвязанных этапа.

Во-первых, использована функция для расчёта нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI, (NormalizedDifferenceVegetation Index) ( $ee.Image.normalizedDifference([x, y])$ , где  $x$  - значение ближнего инфракрасного канала,  $y$  - значение красного канала) на платформе программирования GoogleEarthEngine (GEE) на каждой провинции исследования для разных временных точек исследования: 2010, 2015, 2020.

NDVI позволяет оценить состояние растительности по результатам дистанционного зондирования Земли. NDVI варьируется от -1 до 1 [47]. Чем выше значение NDVI, тем больше растительного покрова на поверхности Земли. Низкие или отрицательные значения NDVI указывают на отсутствие растительности или на водную поверхность. Вычисление NDVI позволяет нам создавать карты, где изменения в цветовой палитре отражают различия в объектах наземного покрова.

Во-вторых, применялись комбинации спектральных каналов, каждая из которых выделяла определенные классы наземного покрова. Комбинация каналов красный-зеленый-синий позволила видеть объекты, которые соответствуют естественным цветам. Хорошее состояние растительности отображается зеленым цветом, растительность удовлетворительного состояния - коричневым, в то время как населенные пункты и города отображаются белым, а водные поверхности - темно-зеленым или черным. Сочетание ближнего инфракрасного канала-красного-зеленого (цветное инфракрасное изображение) распространено в исследованиях растительного покрова из-за способности листьев растений отражать инфракрасное излучение [53]. С использованием этой комбинации

видны различия в насыщенности красного цвета в лесных насаждениях. При обработке данных ДЗЗ удалось увеличить количество собранных опорных точек за счет объединения различных каналов изображения и расчета индекса NDVI. Широколиственные леса имеют более высокий индекс по сравнению со смешанными. Точки соприкосновения разных по составу лесов отличаются по цвету на обработанных спутниковых изображениях.

В-третьих, для оценки точности процесса обработки данных ДЗЗ использованы полярные карты и изображения Google Earth на веб-сайте <https://earth.google.com/>. Для классификации категорий наземного покрова проводились исследования с использованием алгоритма Random Forest. Наземный покров разделили на 5 различных категорий (земли водного фонда; земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения; земли, непокрытые растительностью и нелесные; земли широколиственных смешанных лесов). Для оценки точности классификации наземного покрова, учетные площадки каждой категории разделены на две части: 70% учетных площадок выбраны для классификации и 30% для оценки точности исследования с использованием матрицы ошибок и коэффициента Каппа [77]. Соотношение учетных площадок по категориям наземного покрова приведено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Соотношение учетных площадок по категориям наземного покрова для классификации и оценки точности

Категории наземного покрова	Количество учетных площадок, шт.		
	Для классификации	Для оценки точности	Итого
Земли водного фонда	68	29	97
Непокрытые растительностью и нелесные земли	57	24	81
Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	57	24	81
Земли смешанных лесов	51	22	73
Земли широколиственных лесов	67	29	96

Данные после классификации на платформе GoogleEarthEngine (GEE) использованы в программе ArcGIS 10.8 для последующей обработки.

Использование инструментов "ExtractbyMask" и "Resample" в ArcGIS при обработке позволило выровнять пространственное разрешение и геометрические параметры слоев данных.

После вычисления значений NDVI они отображались в интерфейсе Google Earth Engine (GEE), где каждый пиксель соответствует определенному значению NDVI и отображался цветом: зеленый цвет представлял зоны с растительным покровом, при более интенсивном развитии растительности цвет зелени становится насыщеннее, и наоборот. Желтый цвет указывал земельные участки без растительности или населенные пункты, при этом более насыщенный желтый цвет свидетельствовал о более высокой плотности населения. Белый цвет отображал водные поверхности (рисунок 3.2).

Эта информация позволяла предварительно оценить текущее состояние объектов наземного покрова и их изменения на протяжении временных интервалов 2010-2015-2020 годы. Площади лесных угодий устанавливались по 4 источникам информации: спектральным каналам, значениям NDVI, государственной картой Вьетнама и данным Веб-сайта GoogleEarth. Выделены 5 категорий наземного покрова в каждой зоне по рекомендациям правительства Вьетнама с использованием алгоритма RandomForest, который использован для обучения выбранных учетных площадок с достоверной точностью. С использованием матрицы ошибок (Confusion matrix) рассчитаны значения точностей и коэффициента Каппа. Эта матрица отображает вероятность перехода наземного покрова с одной категории на другую. Таблица 3.3 демонстрирует высокие значения общей, пользователя и производителя точностей и коэффициента Каппа, что свидетельствует о достоверности результатов классификации наземного покрова. Значения коэффициента Каппа по зонам приведены в таблице 3.4. После классификации, данные обработаны в программном обеспечении ArcGIS 10.8 с применением координатной системы WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N для создания карт наземного покрова (рисунок 3.3). Динамика площадей категорий наземного покрова представлена в таблице 3.5.

Разные точности определены по ниже приведенным формулам (3.1-3.3) [39]:

Общая точность =

$$\frac{\text{Сумма правильно классифицированных пикселей}}{\text{Общее количество пикселей}} \times 100 \quad (3.1)$$

Точность пользователя =

$$\frac{\text{количество правильно классифицированных пикселей в данном классе}}{\text{Общее количество классифицированных пикселей в данном классе}} \times 100 \quad (3.2)$$

Точность производителя =

$$\frac{\text{количество правильно классифицированных пикселей в данном классе}}{\text{Общее количество пикселей в данном классе по факту}} \times 100 \quad (3.3)$$

Таблица 3.3 – Оценка различных точностей классификации наземного покрова в климатических зонах Вьетнама

Зоны	Год	Точность, %			Коэффициент Каппа
		общая	пользователя	производителя	
Северная	2010	86	89	88	0.87
	2015	82	84	80	0.81
	2020	82	84	85	0.83
Центральная	2010	89	86	81	0.85
	2015	85	91	87	0.86
	2020	89	91	89	0.81
Южная зона	2010	86	81	83	0.82
	2015	85	89	87	0.88
	2020	88	92	87	0.84

Таблица 3.4 – Диапазоны значений коэффициента Каппа по зонам

Зоны	Диапазоны значений коэффициента Каппа
Северная	0.81-0.87
Центральная	0.81-0.86
Южная	0.82-0.88

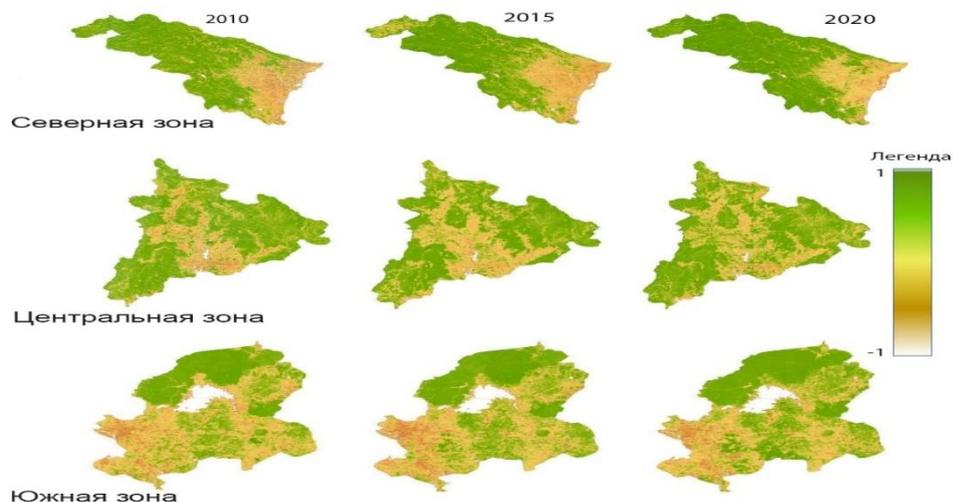


Рисунок 3.2 – Визуализация значений NDVI разных зон

Таблица 3.5 – Динамика площадей наземного покрова в различных зонах

Зоны	Категории наземного покрова	Площадь по годам, га		
		2010	2015	2020
Северная	Земли водного фонда	26370	28603	29167
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	186589	193420	179927
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	182808	188014	200959
	Земли смешанных лесов	535691	475539	430246
	Земли широколиственных лесов	178223	224105	269382
	Итого	1109681	1109681	1109681
Центральная	Земли водного фонда	10085	14089	15318
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	147477	130749	130619
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	232461	238337	291272
	Земли смешанных лесов	445438	443458	424937
	Земли широколиственных лесов	133070	141898	106385
	Итого	968531	968531	968531
Южная	Земли водного фонда	58737	53070	49093
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	124615	105402	103081
	Земли смешанных лесов	169496	188758	190128
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	157588	147635	144871
	Земли широколиственных лесов	79812	95383	103075
	Итого	590248	590248	590248

На основе данных, представленных в таблице 3.5, видно, что в северной зоне площадь земель широколиственных лесов увеличилась на 91159 га (51,15%) за 10-летний период с 2010 по 2020 год. В то же время площадь земель смешанных лесов снизилась на 105445 га (19,68%). Это свидетельствует о восстановлении природных лесных массивов с высокой экологической и экономической ценностью, а также об усилиях правительства по охране лесов от незаконной вырубке. Для центральной зоны в тот же период площадь земель широколиственных лесов уменьшилась на 26686 га (20,05%), а смешанных лесов - на 20501 га (4,60%), в то время как площадь земель кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения увеличилась на 58811 га (25,30%). Это указывает на тенденцию к изменению структуры использования земель из лесного на сельское хозяйство, а также на продолжение незаконной вырубке лесов что создает трудности в охране лесов. В южной зоне, которая имеет наименьшую площадь среди всех трех исследуемых регионов, видно, что

площадь земель широколиственных лесов увеличилась на 23263 га (29,15%), площадь смешанных лесов увеличилась на 20632 га (12,17%), в то время как площадь земель кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения снизилась на 12717 га (8,07%), а площадь нерастительных и нелесных земель сократилась на 21534 га (17,28%). Это указывает на успешность политики и усилий местного населения на охрану, защиту и восстановление лесных массивов, особенно в природных заповедниках, таких как национальный парк Нам Кат Тьен, находящийся в этой зоне.

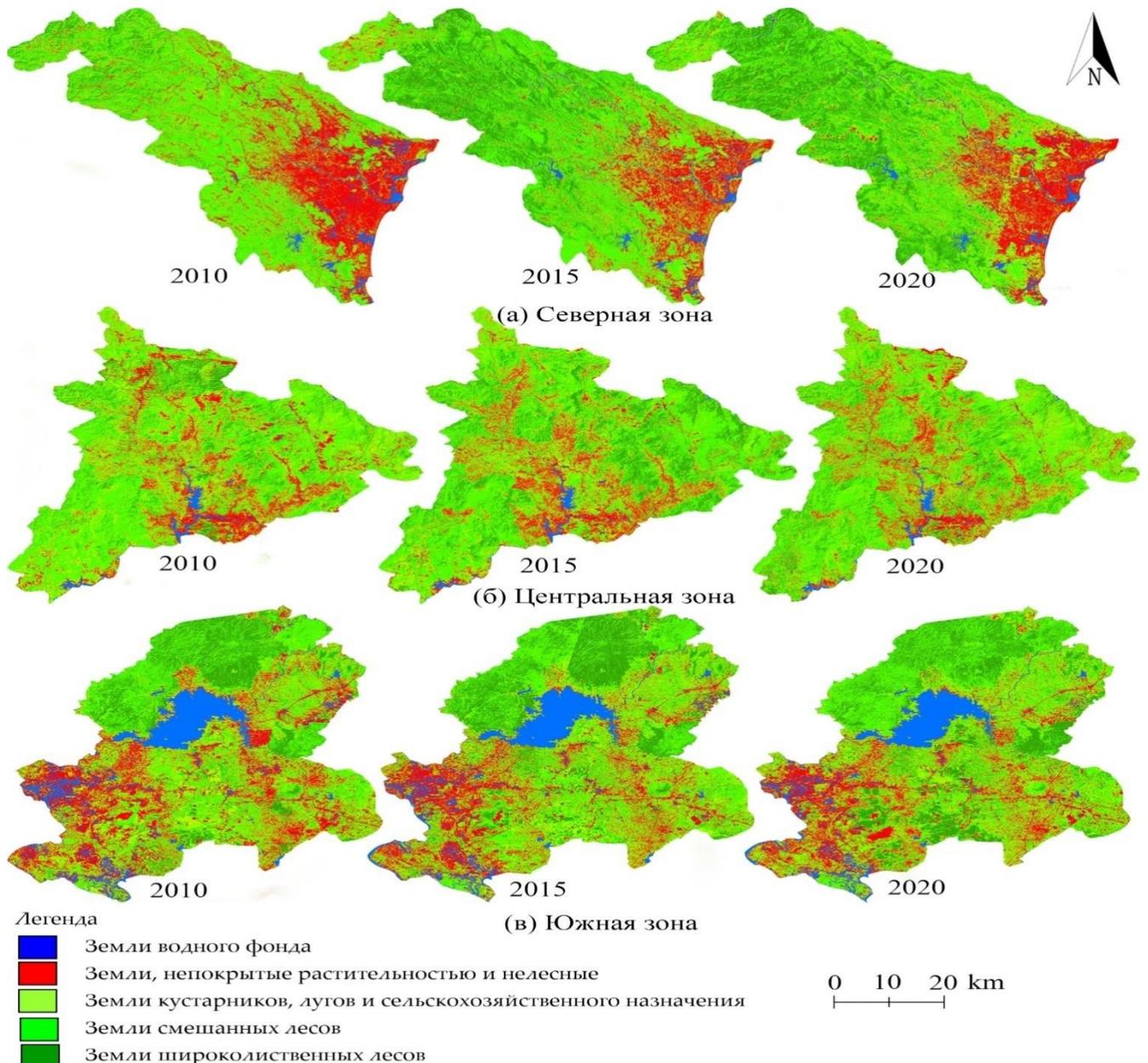


Рисунок 3.3 – Карты наземного покрова на период 2010-2020 гг. в климатических зонах Вьетнама

### 3.2.2 Изменения оценочных показателей насаждений в разных зонах Вьетнама

Распределение породного состава лесных экосистем играет важную роль в поддержании баланса углерода в атмосфере и улучшении экологической ситуации страны [122]. Виды растительности, входящие в природные экосистемы интересуют учёных Вьетнама и других стран. Исследование Li et al. в 2023 году, сфокусировало на изучении лесных угодий с использованием машинного обучения [75]. Исследование Nathalie Guimarães et al. в 2020 году посвящено изучению состава и разнообразия видов заболоченных лесов данными с беспилотных летательных аппаратов [46]. Исследование, опубликованное в 2024 году Hui She et al., выявило характеристики мангровых лесов и их таксационные (оценочные) характеристики [109]. Вышеназванные исследования лесов проводились разными методами: полевые обследования и дистанционное зондирование Земли. Наши исследования также проведены комбинированным методом: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и полевые обследования земель лесного фонда Вьетнама. Установлено, что породный состав древостоев зависит от климатических условий произрастания лесов. По этой причине проведено климатическое зонирование территории страны по индексу Х. Патерсона. В связи с этим в выделенных зонах произрастают леса разного породного состава и структуры. Площади широколиственных и смешанных лесов и преобладающие в них древесные породы по климатическим зонам приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Площади и древесные породы широколиственных и смешанных лесов по выделенным зонам

Зоны	Типы лесов	Площадь, га	Древесные породы
Северная	Широколиственные леса	3535582	Chukrasiatubularis (Чукрасиятабличная), Erythrophleumfordii (Кассия Форда)
	Смешанные леса	5586953	Dipterocarpus alatus (Диптерокарпкрылатый)

Продолжение таблицы 3.6

Центральная	Шикоколиственные леса	778153	Dalbergia cochinchinensis (Далбергия кокхинхинская), Cinnamomum camphora (Камфорное дерево)
	Смешанные леса	2214720	Norea odorata (Хопеядушистая), Anisoptera costata (Анисоптераребристая)
Южная	Шикоколиственные леса	1105226	Magnolia spp. (Магнолии), Terminalia chebula (Миробаланхебула)
	Смешанные леса	4753296	Dipterocarpus alatus (Диптерокарпкрылатый), Shoreasiamensis (Шореясиамская)

Динамика площадей лесных насаждений в разных климатических зонах приведена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Динамика площадей лесных насаждений в климатических зонах

Зоны	Типы лесных насаждений	Площадь по годам, га		
		2010	2015	2020
Северная	Смешанные леса	535691	475539	430246
	Широколиственные леса	178223	224105	269382
	Общая площадь земель	1109681	1109681	1109681
Центральная	Смешанные леса	445438	443458	424937
	Широколиственные леса	133070	141898	106385
	Общая площадь земель	968531	968531	968531
Южная	Смешанные леса	169496	188758	190128
	Широколиственные леса	79812	95383	103075
	Общая площадь земель	590248	590248	590248

Далее рассчитана сомкнутость лесных насаждений за 2010, 2015 и 2020 годы и результаты расчета приведены в таблице 3.8.

Формула (3.4) для вычисления сомкнутости лесных насаждений  $C$  [80]:

$$C = \frac{A_{\text{лес}}}{A_{\text{общ}}}, \quad (3.4)$$

где  $A_{\text{лес}}$  – площадь лесных участков,

$A_{\text{общ}}$  – общая площадь земель.

Таблица 3.8 – Сомкнутость лесных насаждений в климатических зонах за период 2010-2020 гг.

Зоны	Типы лесных насаждений	Сомкнутость полога насаждений		
		2010	2015	2020
Северная	Смешанные леса	0.48	0.43	0.39
	Широколиственные леса	0.16	0.20	0.24
	Общая сомкнутость	0.64	0.63	0.63
Центральная	Смешанные леса	0.46	0.46	0.44
	Широколиственные леса	0.14	0.15	0.11
	Общая сомкнутость	0.60	0.61	0.55
Южная	Смешанные леса	0.29	0.32	0.32
	Широколиственные леса	0.14	0.16	0.17
	Общая сомкнутость	0.43	0.48	0.49

Динамика сомкнутости пологанасаждений вклиматических зонахпоказывает разные тенденции. В северной зонесомкнутость смешанных лесов снизилась на 0.09, что связано с вырубкой лесов из-за промышленного и сельскохозяйственного освоения земель, тогда как сомкнутость широколиственных лесов выросла на 0.08 благодаря мероприятиям по восстановлению лесов и естественномувозобновлению порослевых пород деревьев. В центральной зонесомкнутость смешанных и широколиственных лесов уменьшилась на 0.02 и 0.03 соответственно, что связано с интенсивной вырубкой лесов для нужд промышленности, сельского хозяйства и расширения транспортнойинфраструктуры, атакже с недостаточными мерами по восстановлению лесов. В южной зоне сомкнутость лесов увеличилась (смешанные: +0.03, широколиственные: +0.03) благодаря эффективным программам по восстановлению лесов, управлению охраняемыми территориями и сохранению биоразнообразия.

Для определения относительной полноты лесных насаждений предлагается формула (3.5), отражающая связь между полнотой  $P$  и сомкнутостью [80]:

$$P = C + i, \quad (3.5)$$

где  $C$  – сомкнутость крон лесных насаждений,

$i$  – параметр, значение которого зависит от типа леса и особенностей его распространения, обычно составляет от 0,1 до 0,2.

По формуле (3.5), нами составлена таблица относительной полноты лесных насаждений за период исследований с 2010 года по 2020 год (таблица 3.9). В северной зоне за период 2010-2020 г. полнота смешанных лесов снизилась на 0.08 из-за деградации лесов. Напротив, полнота широколиственных лесов выросла на 0.1 благодаря результатам успешного восстановления лесов и естественного прироста древостоев.

Таблица 3.9 – Относительная полнота лесных насаждений в климатических зонах за период 2010-2020 гг.

Зоны	Типы лесных насаждений	Относительная полнота по годам		
		2010	2015	2020
Северная	Смешанные леса	0.50	0.53	0.42
	Широколиственные леса	0.25	0.31	0.35
	Общая полнота	0.75	0.84	0.77
Центральная	Смешанные леса	0.56	0.58	0.51
	Широколиственные леса	0.25	0.25	0.22
	Общая полнота	0.76	0.83	0.78
Южная	Смешанные леса	0.33	0.40	0.38
	Широколиственные леса	0.24	0.25	0.27
	Общая полнота	0.57	0.65	0.65

В центральной зоне полнота смешанных лесов уменьшилась на 0.05, а широколиственных — на 0.03, отражая снижение полноты и деградацию древесного покрова из-за вырубki и недостаточного восстановления лесов. В южной зоне полнота смешанных лесов увеличилась на 0.05, а широколиственных — на 0.03, что связано активным ростом древостоев в благоприятных условиях, улучшением системы управления лесами, охраной и защитой лесов от пожаров и вредителей.

Для расчета запаса древесины использована формула (3.6) [80]:

$$Z = M \times S, \quad (3.6)$$

где  $Z$  – запас древесины, м<sup>3</sup>,

$M$  – средний запас для данного типа лесных насаждений, м<sup>3</sup>/га,

$S$  – площадь данного типа лесных насаждений, га.

Значение среднего запаса  $M$  варьируется в зависимости от конкретного типа лесных насаждений различных климатических зон Вьетнама и определяется на

основе долгосрочных исследований с учетом сомкнутости лесных насаждений. По циркуляру № 33/2018/ТТ-BNNPTNT Министерства сельского хозяйства и развития сельских территорий Вьетнамаи [81] данным сомкнутости лесных насаждений, полученным в ходе нашего исследования, составлена таблица, отображающая значения средних запасов смешанных и широколиственных лесов различных зон (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Средние запасы лесных насаждений в климатических зонах

Типы лесных насаждений	Средние запасы по зонам, десятки М <sup>3</sup> /га		
	Северная	Центральная	Южная
Смешанные леса	80	85	95
Широколиственные леса	125	140	150

По данным средних запасов и площадей различных категорий лесных насаждений, вычислены запасы древесины в климатических зонах за период исследований 2010-2020 гг. (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Запасы древесины в климатических зонах за период 2010-2020 гг.

Зоны	Категории лесных насаждений	Запасы, десятки М <sup>3</sup>		
		2010	2015	2020
Северная	Смешанные леса	42855280	38043120	34419680
	Широколиственные леса	22277875	28013125	33672750
	Общий запас	65133155	66056245	68092430
Центральная	Смешанные леса	37862230	37693930	36119645
	Широколиственные леса	18629800	19865720	14893900
	Общий запас	56492030	57559650	51013545
Южная	Смешанные леса	16102120	17932010	18062160
	Широколиственные леса	11971800	14307450	15461250
	Общий запас	28073920	32239460	33523410

В течение 10-летнего периода в северной зоне запасы смешанных лесов снизились на 84.4 млн м<sup>3</sup>, а широколиственных увеличились на 113.9 млн м<sup>3</sup> за 2010–2020 годы. Снижение связано с деградацией и вырубкой лесов, тогда как рост широколиственных лесов обусловлен восстановлением и увеличением их полноты и сомкнутости. В центральной зоне запасы смешанных лесов сократились на 17.4 млн м<sup>3</sup>, а широколиственных — на 37.4 млн м<sup>3</sup>, что связано с интенсивной вырубкой и слабым восстановлением. В южной зоне запасы

смешанных лесов выросли на 19.6 млн м<sup>3</sup>, а широколиственных — на 34.9 млн м<sup>3</sup> благодаря эффективным мерам по восстановлению, охране и управлению лесами.

На основе анализа выделенных климатических зон Вьетнама по климатическим условиям, данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и наземным исследованиям выявлены растительные сообщества, которые приведены в таблице 3.12. В таблице представлены породы с краткой характеристикой насаждений, отражающей структуру основных растительных сообществ с соответствующими типами лесов Вьетнама. Породный состав лесов установлены по литературным источникам [119, 81].

Таблица 3.12 – Растительные сообщества и преобладающие породы в них Вьетнама

Виды растительных сообществ (экосистем)	Преобладающие породы	
	Русское название	Латинское название
Широколиственные леса	Мадука длиннолистная	<i>Madhuca longifolia</i>
	Птерокарпус	<i>Pterocarpus</i>
	Диптерокарпус obtusifoliус	<i>Dipterocarpus obtusifolius</i>
	Чукрасия табличная	<i>Chukrasia tabularis</i>
	Парашорея китайская	<i>Parashorea chinensis</i>
Смешанные леса	Магнолия белая	<i>Magnolia alba</i>
	Ель европейская	<i>Picea excelsa</i>
	Каштан посевной	<i>Castaneasativa</i>
	Сосна Меркюза	<i>Pinus merkusii</i>
	Кастанопис индийский	<i>Castanopsis indica</i>
	Бамбук	<i>Bambuseae</i>
	Дендрокаламус	<i>Dendrocalamus</i>
	Тре обыкновенный	<i>Bambusa vulgaris</i>
Тирсостахис сиамский	<i>Thyrsostachyssiensis</i>	
Мангровые леса	Ризофора остроконечная	<i>Rhizophora mucronata</i>
	Бругиера голокорневая	<i>Bruguiera gymnorhiza</i>
	Цериопс тагальский	<i>Ceriops tagal</i>
	Авиценния морская	<i>Avicennia marina</i>

Исключение составляют мангровые леса, которые приурочены к побережью Южно-Китайского моря. Мангровые леса являются особым видом природных экосистем [62]. Они произрастают на литоральных (приливно-отливной зоне), где происходит смешение пресной и соленой воды. Во Вьетнаме мангровые леса

распространены в дельтах рек Красной и Меконг. Мангровые леса произрастают на приливных и низинных землях и характеризуются высоким разнообразием растительных видов [62]. Мангровые леса Вьетнама являются важным природным ресурсом и источником сырья для ряда отраслей промышленности: древесина, аквакультура, лекарственные и пищевые растения. Мангровые леса также играют важную защитную роль прибрежных участков земли, регулируют климат и балансируют экосистемы морского побережья страны, играют важную роль в экологии страны и выполняют различные функции, но нуждаются в особой охране, так как подвергаются антропогенному воздействию, требуют защиты, охраны разнообразия видов.

Биологическая характеристика преобладающих древесных пород растительных сообществ Вьетнама представлена в таблице 3.13. Эта характеристика является основой для разработки своевременных мероприятий, направленных на эффективное управление разными растительными сообществами [78].

Таблица 3.13 – Биологические характеристики преобладающих древесных породрастительных сообществ

<b>Порода</b>	<b>Биологическая характеристика</b>
Мадука длиннолистная	Быстрорастущее полулистопадное или вечнозелёное дерево, достигающее до 20 м в высоту. Культивируется в тропиках ради маслянистых семян и мясистых цветков
Птерокарпус	Большое лиственное дерево, высотой до 30–40 м, с диаметром ствола до 2 м. Листья длиной 12—22 см, перистые, с 5–11 листочками, обхват 12–34 м в ширину. Цветы в метелках длиной 6–13 см
Диптерокарпус обтусифолиус	Крупные вечнозелёные деревья высотой 40—60 м. Ствол стройный, маловетвящийся, до 2 м в диаметре. Крона компактная. Листья очередные, кожистые, цельные. Прилистники крупные, яйцевидные.
Магнолия белая	Вечнозелёное дерево до 30 м высотой, в субтропиках ствол до 1,4 м в тропиках до 20 м и до 5 м в Средней полосе страны.
Ель европейская	Вечнозелёное дерево. Корневая система поверхностная. Дерево слабо ветроустойчиво, часто ветровальное.

Продолжение таблицы 3.13

Каштан посевной	Средних размеров листопадное дерево: в лесу— со стройным стволом до 35 м высотой и до 1 м в диаметре, при одиночном произрастании — высотой до 25 м, с раскидистой кроной и стволом до 2 м в диаметре
Бамбук	Многолетнее растение, древовидное или кустарник. Корневища хорошо развиты, с мощным одревесневающим стеблем — соломиной. Стебель высокий, цилиндрический, высотой до 40 м и до 30 см в диаметре
Дендрокаламус	Крупнейшая в мире разновидность бамбука, достигающая до 40 м в высоту. Культивируется кроме Вьетнама в Индии, Бирме и Индокитае.
Ризофора остроконечная	Вечнозелёное дерево, достигающее высоты 25 - 35 м. Диаметр ствола может достигать 50—70 см, причём к 35—40 годам — 19 см. Характерным многочисленным ветвящимся опорным воздушным корням.
Бругиера голокорневая	Вечнозелёное дерево, высотой 8—25 м, иногда достигающее 35 м. Ствол диаметром 40—90 см, у основания укреплен плоскими вертикальными выростами. Относительно медленно растущее и предположительно долгоживущее

### 3.3 Выводы по главе 3

По результатам исследования главы 3 можно сделать следующие выводы:

1. В главе рассмотрено текущее состояние лесных земель Вьетнама, включая породный состав (широколиственные леса, смешанные леса) и оценочные показатели древостоев, такие как полнота, сомкнутость и запасы древесины. Вьетнам - страна с большой площадью лесов, превышающей 14 миллионов гектаров, сталкивается с рядом проблем, связанных с лесными землями. Среди них сокращение лесных площадей из-за изменения структуры использования земель для нужд промышленности и урбанизации, незаконная вырубка лесов и влияние изменений климата. В результате страдает вся экосистема, снижается способность поглощать CO<sub>2</sub>, регулировать климат, ухудшается состояние почвы, возрастает риск эрозии и наводнений. Кроме того, недостатки в мониторинге и управлении лесами ограничивают возможности своевременного обнаружения изменений в лесных землях и принятия

необходимых мер реагирования. На данный момент традиционный метод мониторинга лесных земель на местности остается основным. Однако у него есть ряд недостатков, таких как высокая стоимость, сложность процедур, необходимость большого числа специалистов и трудности применения в районах с сложным рельефом. На этой основе наше исследование предлагает использовать метод дистанционного зондирования для улучшения качества мониторинга и снижения затрат.

2. Изменения площадей лесов в климатических зонах: северной, центральной и южной, оценены за период с 2010 по 2020 годы. Используются данные дистанционного зондирования спутников Landsat 7, 8, Sentinel 2 и цифровая модель рельефа (DEM). Индекс NDVI рассчитан для оценки состояния растительности, а алгоритм RandomForest принят для классификации объектов наземного покрова. Сочетание данных дистанционного зондирования и технологий ГИС на платформе GoogleEarthEngine и программного обеспечения ArcGIS продемонстрировало высокую точность и надежность результатов мониторинга состояния наземного покрова, что подтверждается высоким значением коэффициента Каппа в диапазоне от 0.81 до 0.89. Результаты расчетов показывают, что в период 2010–2020 годов климатические зоны продемонстрировали разные тенденции в изменении площадей лесных земель. В северной зоне площадь смешанных лесов сократилась на 105 445 га (19,68%) из-за вырубки лесов промышленным и сельскохозяйственным освоением, а площадь широколиственных лесов увеличилась на 91 159 га (51,15%), что отражает восстановление лесных массивов благодаря охранным мерам местного правительства. В центральной зоне, напротив, площади широколиственных и смешанных лесов сократились на 26 686 га (20,05%) и 20 501 га (4,60%) соответственно, с увеличением сельскохозяйственных земель на 58 811 га (25,30%), что связано с незаконной вырубкой для лесозаготовки и трансформацией земель. В южной зоне наблюдался рост площадей земель смешанных лесов на 20632 га (12,17%) и земель широколиственных лесов на 23263 га (29,15%), при сокращении площадей сельскохозяйственных и нелесных

земель, что демонстрирует успешную политику провинции и усилия населения на восстановление, защиту и охрану лесных массивов.

3. За период исследования с 2010 года по 2020 год в северной зоне, полнота смешанных лесов значительно снизилась на 0.08, в то время как полнота широколиственных лесов выросла на 0.1; сомкнутость смешанных лесов уменьшилась на 0.09, но увеличилась для широколиственных лесов (0.08); общие запасы лесных насаждений выросли на 29.5 м<sup>3</sup> за счет увеличения доли широколиственных лесов. Наблюдается переход от смешанных лесов к широколиственным, что связан с восстановлением более продуктивных широколиственных лесов. Увеличение запасов и полноты широколиственных лесов свидетельствует об успешных мерах восстановления. В центральной зоне, полнота смешанных лесов слегка снизилась на 0.05, а широколиственных — 0.03; сомкнутость снизилась для обоих типов лесов (смешанные -0.02, широколиственные -0.03); общие запасы лесов сократились на 54.8 млн м<sup>3</sup>, отражая деградацию обоих типов лесов. Зона столкнулась с ухудшением состояния лесов из-за незаконной вырубки и недостаточного восстановления лесов. В южной зоне, полнота смешанных лесов увеличилась на 0.05, так же как и полнота широколиственных лесов (0.03); сомкнутость также увеличилась для обоих типов лесов на 0.03; общие запасы лесов выросли на 54.5 млн м<sup>3</sup>. Успешные меры по восстановлению лесов и их охране привели к значительному улучшению состояния лесного покрова. Южная зона демонстрирует положительный пример управления лесами. В целом, оценочные показатели лесных насаждений, включающие полноту, сомкнутость и запасы тесно взаимосвязаны. Увеличение сомкнутости, полноты приводит к росту запасов, а их снижение отражает деградацию лесов и приводит к уменьшению запасов.

## **ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ОЦЕНОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ НА ПЕРСПЕКТИВУ**

### **4.1 Теоретические основы прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам**

В последние годы земли лесного фонда Вьетнама подверглись изменениям из-за природных и антропогенных факторов. По данным предыдущих исследований вьетнамских ученых, площадь лесов страны претерпела резкие колебания: от сокращения из-за вырубki и расширения сельскохозяйственных угодий до увеличения в результате правительственных программ лесовосстановления, поддержанных инициативами местных органов власти [92]. Однако сокращение лесных угодий продолжает оставаться серьезной проблемой, особенно в горных районах.

Мониторинг и прогнозирование динамики изменения площади лесных территорий имеют первостепенное значение для эффективного управления и сохранения природных ресурсов. Эти изменения оказывают воздействие не только на лесные экосистемы, но и на национальную экономику, сохранение биоразнообразия, защиту водных источников и обеспечение климатической стабильности. Прогнозирование изменений в лесных угодьях позволяет разработать научно обоснованные меры, направленные на защиту и восстановление лесов, а также на адаптацию к изменяющимся условиям. Таким образом, задачи прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда включают в себя решение следующих ключевых задач:

Прогнозы должны быть достоверными, чтобы эффективно поддерживать планирование мер по защите и развитию лесов. Для достижения этой цели необходимо использовать методы прогнозирования, основанные на актуальных, высокоточных и регулярно обновляемых данных местности.

Результаты прогнозов должны предоставлять властям возможность разрабатывать эффективные мероприятия по защите, охране и восстановлению

лесных ресурсов. Кроме того, они должны способствовать корректировке политики и рационального землепользования лесного фонда.

Применение данных дистанционного зондирования в сочетании с географическими информационными системами (ГИС) имеет важное значение для сбора, анализа и прогнозирования изменений лесного покрова. Эти технологии обеспечивают непрерывный и точный мониторинг лесных угодий, а также позволяют прогнозировать будущие тенденции с высокой точностью.

Процесс прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда Вьетнама требует сочетание научных методов, фактических данных и эффективных аналитических инструментов. Достоверное прогнозирование динамики площади земель лесного фонда играет важную роль в оценке эффективности политики управления, защиты, охраны и развития лесов, а также в планировании управления природными ресурсами [125]. Этот процесс включает в себя следующие этапы: сбор и обработку данных; выбор методов; построение модели; прогнозирование и анализ результатов.

Первым этапом прогнозирования изменений площади лесов является сбор и предварительная обработка данных различных источников. Основными источниками информации являются спутниковые снимки, данные географических информационных систем (ГИС), результаты полевых исследований, карты состояния лесных угодий, предоставленные местными органами власти, а также факторы, влияющие на рост и развитие лесных ресурсов: рельеф, почва, температура, осадки. Эти данные подразделяется на следующие категории:

*Карты наземного покрова* являются базой для построения прогнозных моделей. Они включают результаты обработки спутниковых снимков Landsat-7, Landsat-8 и Sentinel-2. Для анализа используются программные обеспечения ArcGIS и QGIS, которые доставляют высокую точность обработки, охватывают периоды 2015, 2020 и 2024 годов и классифицируются на пять категорий: земли водного фонда; земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения; земли, непокрытые растительностью и нелесные; земли смешанных и широколиственных лесов.

Цифровая модель рельефа, сведения о температуре и количестве осадков (по данным рисунков 2.3 и 2.4) являются переменными факторами воздействия на модель. На рисунке 4.1 представлены пространственные параметры цифровой модели рельефа и уклона местности, используемые в данном исследовании.

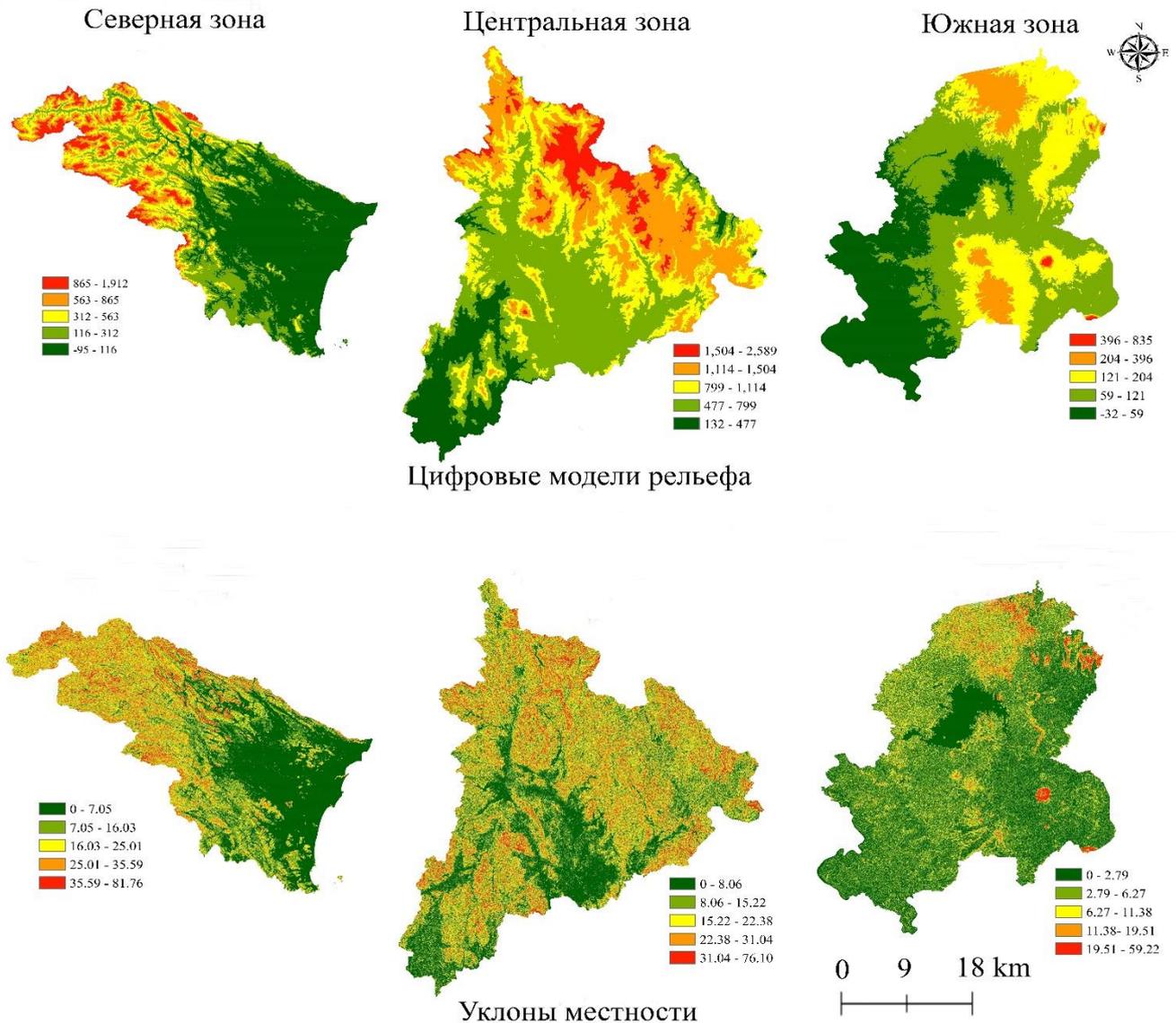


Рисунок 4.1 – Используемые при исследовании данные рельефа

Рельеф оказывает влияние на доступность территории, развитие городской и сельскохозяйственной инфраструктуры, а также на степень покрытия и тип растительности. В то же время температура влияет на разные категории наземного покрова (широколиственные леса, смешанные леса, сельскохозяйственные угодья и др.), процессы роста растительности и вероятность возникновения лесных пожаров. Количество осадков определяет влажность почвы, тип растительности, процессы эрозии и характер использования

сельскохозяйственных земель. Указанные факторы существенно влияют на динамику наземного покрова, поэтому они выбраны в качестве факторов воздействия для прогнозирования в рамках нашего исследования.

Карты наземного покрова и факторы воздействия интегрируются в программу Arcgis и преобразуются в единственную систему координат (WGS 84). Теоретические основы прогнозирования земель — это совокупность научных положений, методов, моделей и принципов, лежащих в основе предсказания изменений в состоянии, использовании и пространственной структуре земельных ресурсов под влиянием природных и антропогенных факторов. Принцип прогнозирования - это природно-социальное взаимодействие — взаимосвязь между природными условиями и хозяйственной деятельностью человека. Пространственно-временной принцип моделирования – изменение оценочных показателей на определенной территории (климатической зоне) в течение времени (5 лет). Прогнозирование динамики состояния лесов во Вьетнаме представляет собой важную и комплексную задачу, требующую применения современных научных методов. Для прогнозирования используют алгоритм SA-Markov, основанный на применении марковских матриц перехода, обычно используется для решения задачи прогноза состояния землепользования и наземного покрова [140]. Этот популярный метод позволяет моделировать изменения наземного покрова, анализируя вероятности перехода между различными классами. В настоящее время, с развитием технологий искусственного интеллекта, чаще используют алгоритм MOLUSCE, основанный на искусственных нейронных сетях (ИНС). Эти подходы обеспечивают высокую эффективность при обработке больших объемов данных и учитывают сложные зависимости в динамике земель лесного фонда. Любой метод обладает своими достоинствами и ограничениями. Выбор подходящего метода прогнозирования зависит от качества исходных данных и целей исследования.

## 4.2 Методы прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда в разных зонах Вьетнама

Прогнозировалась трансформация оценочных показателей земель лесного фонда по двум алгоритмам.

**Алгоритм CA-Markov** представляет собой инструмент для моделирования пространственно-временных переходов между типами наземного покрова. Он используется при прогнозировании изменений в распределении земельных ресурсов, таких как трансформация земель лесного фонда в сельскохозяйственные угодья или другие категории землепользования. Основой этого метода является теория марковских цепей, которая предполагает, что будущее состояние наземного покрова зависит от его текущего состояния, без учета предшествующих процессов (так называемое марковское свойство) [40, 115]. Процесс применения алгоритма CA-Markov включает следующие этапы:

*Сбор данных.* Источниками информации являются спутниковые снимки, классифицированные карты земель, данные полевых исследований и другие необходимые материалы. Для достижения высокой точности анализа данные собираются за длительные временные промежутки, что позволяет выявить основные тенденции изменений. Данные обрабатываются и классифицируются по различным категориям наземного покрова, включая леса разного породного состава, земли сельскохозяйственного назначения и другие категории. Этот этап применяет методы классификации спутниковых изображений и инструменты ГИС для создания карт наземного покрова.

*Построение модели CA-Markov.* Этот процесс включает в себя определение соответствующих категорий наземного покрова, построение матрицы перехода на основе исторических данных и выполнение расчетов для прогнозирования изменений в будущем земельном покрове. Матрица перехода отражает вероятности преобразования одной категории наземного покрова в другой. Например, если вероятность преобразования широколиственных лесов на смешанные леса составляет 0,4, соответствующий элемент матрицы будет иметь это значение. Модель CA-Markov рассчитывает вероятность перехода между

категориями наземного покрова и применит ее к прогнозным периодам.

*Прогнозирование изменений.* На основе матрицы перехода модель SA-Markov прогнозирует изменения наземного покрова для каждой категории на заданный период времени. Результаты прогнозирования включают расчет площади для каждого типа земного покрова на определенные будущие периоды, что позволяет оценить динамику изменений.

При алгоритме SA-Markov, площадь наземного покрова  $S(t+n)$  в будущий момент времени  $t+n$  определяется по формуле (4.1) [140]:

$$S(t+n) = P^n \times S(t), \quad (4.1)$$

где  $S(t)$  – площадь наземного покрова в начальный момент времени  $t$  в виде матрицы (столбцов), представляющей площадь по соотношению категорий наземного покрова,

$P$  – матрица перехода SA-Markov определяет вероятность изменения одной категории наземного покрова на другую в течение определенного периода времени,

$n$  – количество временных шагов (период прогноза),

$S(t+n)$  – площадь наземного покрова, прогнозируемого на момент времени  $t+n$ .

Матрица преобразования  $P$  представляет собой квадратную матрицу размера  $k \times k$ , где  $k$  — количество категорий наземного покрова (в данном исследовании  $k=5$ ) [89]. Каждая запись из  $P_{ij}$  в матрице  $P$  представляет вероятность перехода из категории  $i$  в категорию  $j$  в течение определенного периода времени, которая определяется по формуле (4.2) [140]:

$$P_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^k A_{ij}}, \quad (4.2)$$

где  $A_{ij}$  – площадь, переведенная из категории  $i$  в категорию  $j$  за период наблюдения,

$\sum_{j=1}^k A_{ij}$  – общая площадь слоя  $i$  во всем пространстве в начальный момент времени,

$P_{ij}$  – вероятность перехода из категории  $i$  в категорию  $j$ .

Эта матрица строится путем анализа двух наборов данных о наземном покрове в два разных момента времени.

Начальная площадь  $S(t)$  часто представляется в виде матрицы-столбца по формуле (4.3), где каждый элемент  $S_i(t)$  представляет площадь или процент наземного покрова  $i$  в момент времени  $t$  [140]:

$$S(t) = \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \\ S_4(t) \\ S_5(t) \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

где  $S_a(t)$  – площадь категории наземного покрова в момент времени  $t$  (2020 г),

$S_1$  – широколиственные леса,

$S_2$  – смешанные леса,

$S_3$  – кустарники, луги и земли сельскохозяйственного назначения,

$S_4$  – непокрытые растительностью и нелесные земли,

$S_5$  – земли водного фонда.

При прогнозировании на несколько временных шагов необходимо рассчитать мощность матрицы преобразования по формуле (4.4):

$$P^n = P \times P \times \dots P \text{ (} n \text{ раз)}, \quad (4.4)$$

где  $P$  – матрица преобразования.

Затем площадь наземного покрова в момент времени  $t+n$  в будущем рассчитывается по формуле 4.1.

**Алгоритм MOLUSCE** представляет собой искусственные нейронные сети (ИНС) для моделирования сложных явлений. Эти сети способны обучаться на исторических данных, выявлять комплексные взаимосвязи между различными факторами и создавать достоверные прогнозы. Основой алгоритма является имитация принципов работы человеческого мозга, при этом нейроны соединяются друг с другом, образуя реакции и принимая решения. Применительно к мониторингу земель лесного фонда алгоритм MOLUSCE позволяет учитывать настоящее состояние лесов, климат и рельеф [112]. Процесс применения этого алгоритма включает в себя следующие основные этапы:

*Сбор данных.* Включает историческую информацию о динамике изменения лесных площадей, климатические показатели и экологические характеристики, влияющие на лесной покров. Необходимо провести предварительную обработку данных. Эта работа включает стандартизацию данных и обеспечение их согласованности. Качественная обработка важна для корректного обучения модели и повышения точности результатов прогноза.

*Создание и обучение модели ИНС.* Построение модели включает выбор количества скрытых слоев и нейронов в каждом слое, а также соответствующих функций активации. Данные делятся на обучающий набор и тестовый набор, а в процессе обучения используются алгоритмы оптимизации, такие как обратное распространение ошибки, для корректировки весов модели. После обучения модель будет протестирована для получения максимальной точности результатов прогноза [73]. Нейронная сеть включает входной слой, скрытые слои и выходной слой. Входной слой принимает данные об исходном состоянии наземного покрова, природных и антропогенных факторах, а выходной слой показывает прогнозируемые значения, такие как площадь лесов в будущем. Обучение сети осуществляется с использованием алгоритма обратного распространения ошибки, который корректирует веса нейронов для минимизации разницы между фактическими и прогнозируемыми значениями [25].

*Прогнозирование и тестирование модели.* После обучения модель используется для прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда. Эффективность модели оценивается с помощью разделения данных на обучающую и тестовую выборки. Полученные результаты сравниваются с фактическими данными для оценки точности модели [26].

Основная формула алгоритма MOLUSCE (4.5) записывается следующим образом [26]:

$$y_i = f(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + b_j), \quad (4.5)$$

где  $x_i$  – входные характеристики оценочных показателей насаждений,

$w_{ij}$  – вес связи между нейронами: входным  $i$  и скрытым  $j$ ,

$b_j$  – коэффициент компенсации (смещения) нейрона  $j$ ,

$y_i$  – входные данные нейрона скрытого слоя  $j$ ,

$f$  – функция активации, обычно используемая:

Функция sigmoid:  $f(x) = \frac{1}{1+e^x}$ ;

Функция ReLU:  $f(x) = \max(0, x)$ ;

Функция:  $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ .

Выход сети  $Y$  будет рассчитываться следующей формулой (4.6) [130]:

$$Y = f(\sum_{j=1}^m w_{jk} y_j + b_k), \quad (4.6)$$

где  $w_{jk}$  — вес между скрытыми выходным слоями,

$y_i$  – входные данные нейрона скрытого слоя  $j$ ,

$b_k$  - коэффициент компенсации (смещения) нейрона  $k$ .

В структуру модели ИНС входят:

*Входной слой (input layer)* предоставляет входные данные  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ , которые включают в себя: текущие данные площади наземного покрова; природные факторы: температура, влажность, уклон, осадки; антропогенные факторы: расстояние лесов до дорог, городские районы, влияние политики защиты лесов [70].

*Скрытые слои (hidden layers)* предоставляют один или несколько скрытых слоев, которые используются для обнаружения нелинейных связей между входными данными и изменениями наземного покрова. Количество скрытых слоев и количество нейронов в каждом слое определяется при конкретной задаче.

*Выходной слой (output layer)* является прогнозируемым состоянием наземного покрова  $Y$ , представляющим вероятность или площадь каждой категории наземного покрова [44].

Обучение ИНС — это процесс поиска оптимальных значений весов  $w_{ij}$ ,  $w_{jk}$  и коэффициентов компенсации  $b_j$ ,  $b_k$  посредством оптимизации функции ошибок (lossfunction) [128]. Формулы, используемые для обучения ИНС, включают:

1. Функция ошибок (loss function):

Общая функция ошибок  $L$ , используемая при прогнозировании наземного покрова, определяется по формуле (4.7) [73]:

$$L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\hat{Y}_i - Y_i)^2, \quad (4.7)$$

где  $\hat{Y}_i$  – результаты прогнозирования вероятности площади наземного покрова из ИНС,

$Y_i$  – фактические значения площади наземного покрова по данным обучения,

$m$  – количество выборок в обучающем наборе.

## 2. Обратное распространение (Backpropagation).

В процессе обучения используется алгоритм обратного распространения ошибки для обновления весов и коэффициентов компенсации в сторону уменьшения значения функции ошибок [73]. Этот алгоритм выражается формулами (4.8) и (4.9):

$$w_{ij}^{(t+1)} = w_{ij}^{(t)} - \mu \frac{\partial L}{\partial w_{ij}}, \quad (4.8)$$

$$b_j^{(t+1)} = b_j^{(t)} - \mu \frac{\partial L}{\partial b_j}, \quad (4.9)$$

где  $\mu$  – скорость обучения,

$\frac{\partial L}{\partial w_{ij}}$  – производная функции ошибок по весам,

$\frac{\partial L}{\partial b_j}$  – производная функции ошибок по коэффициенту компенсации нейрона  $j$ ,

$w_{ij}$  – вес связи между нейронами: входным  $i$  и скрытым  $j$ ,

$b_j$  – коэффициент компенсации (смещения) нейрона  $j$ .

После обучения модель ИНС используется для прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда (4.10) [26]:

$$\hat{Y} = ANN(X), \quad (4.10)$$

где  $X$  – набор входных данных (факторы воздействия и входные значения оценочных показателей земель лесного фонда),

$\hat{Y}$  – результаты прогноза, представляющие значения оценочных показателей земель лесного фонда в будущем,

$ANN$  - искусственная нейронная сеть.

### 4.3 Результаты прогнозирования трансформации оценочных показателей земель лесного фонда в разных зонах Вьетнама по алгоритмам SA-Markov и MOLUSCE с применением искусственной нейронной сети

**Алгоритм SA-Markov.** В данном исследовании использованы входные данные наземного покрова за 2010, 2015 и 2020 годы. На первом этапе строится матрица переходов  $P$ , которая определяет вероятность перехода между категориями наземного покрова в период с 2010 по 2015 год. Затем с использованием модели SA-Markov делаются прогнозы трансформации площадь наземного покрова на 2020 год, которые сравниваются с фактическими классифицированными данными за этот год. Данные о площади категорий наземного покрова за 2010, 2015 и 2020 годы представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Данные площадей категорий наземного покрова

Зоны	Категории наземного покрова	Площадь, га		
		2010	2015	2020
Северная	Земли водного фонда	26370	28603	29167
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	186589	193420	179927
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	182808	188014	200959
	Земли смешанных лесов	535691	475539	430246
	Земли широколиственных лесов	178223	224105	269382
	Итого	1109681	1109681	1109681
Центральная	Земли водного фонда	10085	14089	15318
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	147477	130749	130619
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	232461	238337	291272
	Земли смешанных лесов	445438	443458	424937
	Земли широколиственных лесов	133070	141898	106385
	Итого	968531	968531	968531
Южная	Земли водного фонда	58737	53070	49093
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	124615	105402	103081
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	157588	147635	144871
	Земли смешанных лесов	169496	188758	190128
	Земли широколиственных лесов	79812	95383	103075
	Итого	590248	590248	590248

Составление матрицы вероятности перехода  $P$  для каждой зоны в период 2010-2015 гг. дает результаты, приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрицы вероятности перехода  $P$  категорий наземного покрова в период 2010-2015 гг.

Северная зона					
	1	2	3	4	5
1	0.74671	0.21926	0.01674	0.01142	0.00586
2	0.03048	0.60770	0.27833	0.07095	0.01255
3	0.00689	0.25713	0.41218	0.28342	0.04038
4	0.00163	0.02289	0.13570	0.60814	0.23165
5	0.00049	0.00670	0.02054	0.31231	0.65996
Центральная зона					
	1	2	3	4	5
1	0.88973	0.10165	0.00675	0.00160	0.00028
2	0.01414	0.49168	0.37063	0.10923	0.01433
3	0.00210	0.18876	0.49949	0.26653	0.04312
4	0.00082	0.04047	0.26572	0.62898	0.06402
5	0.00039	0.01400	0.04112	0.48046	0.46402
Южная зона					
	1	2	3	4	5
1	0.87346	0.09490	0.01452	0.00772	0.00941
2	0.02152	0.65574	0.25672	0.05171	0.01430
3	0.00180	0.12524	0.54507	0.26504	0.06285
4	0.00091	0.04575	0.17286	0.59630	0.18419
5	0.00057	0.01797	0.04180	0.34207	0.59759

Площадь категорий наземного покрова, прогнозируемого на 2020 год  $S(2020)$  рассчитывается как произведение  $P$  – матрицы вероятности перехода категорий наземного покрова в период 2010-2015 гг и  $S(2015)$  – площади категорий наземного покрова в 2015 году (4.11):

$$S(2020) = P \times S(2015) \quad (4.11)$$

Результаты прогноза площадей категорий наземного покрова по модели СА-Markov для разных зон показаны в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты прогноза площадей по модели СА-Markov на 2020 год

Категории наземного покрова	Площадь по зонам, га		
	Северная	Центральная	Южная
Земли водного фонда	71087	29579	57204
Земли, непокрытые растительностью и нелесные	200069	220331	117148
Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	262116	288020	148833
Земли смешанных лесов	355485	356780	162160
Земли широколиственных лесов	317497	267344	134569
Сумма	1207254	1165054	619914

Сравнение фактических данных и прогнозных результатов показано в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнение фактических данных и прогнозных результатов в разных зонах 2020 года

Зоны	Категории наземного покрова	Площадь, га		
		По прогнозу	По фактическим данным	Погрешность (%)
Северная	Земли водного фонда	71087	29167	143.72
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	200069	179927	11.19
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	262116	200959	30.43
	Земли смешанных лесов	355485	430246	-17.38
	Земли широколиственных лесов	317497	269382	17.86
	Итого	1207254	1109681	8.79
Центральная	Земли водного фонда	29579	15318	93.10
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	220331	130619	68.68
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	288020	291272	-1.12
	Земли смешанных лесов	356780	424937	-16.04
	Земли широколиственных лесов	267344	106385	151.30
	Итого	1165054	968531	20.29
Южная	Земли водного фонда	57204	49093	16.52
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	117148	103081	13.65
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	148833	144871	2.73
	Земли смешанных лесов	162160	190128	-14.71
	Земли широколиственных лесов	134569	103075	30.55
	Итого	619914	590248	5.03

**Алгоритм MOLUSCE** основан на применении искусственных нейронных сетей для прогнозирования текущего состояния наземного покрова в разных климатических зонах Вьетнама с использованием входных данных о наземном покрове за 2010, 2015 и 2020 годы, а также роли факторов воздействия - пространственных параметров, в том числе: рельеф, уклон, количество осадков, температура. В настоящем исследовании данные о среднегодовой температуре и количестве осадков получены из базы данных WorldClim в формате растровых изображений GeoTIFF с пространственным разрешением 1 км. Затем данные обрезаны в пределах области исследования с использованием инструмента Extract by Mask в программном обеспечении ArcGIS и приведены к единой системе координат с данными о наземном покрове — WGS 84 / UTM Zone 48N.

Обработанные данные загружены в алгоритм MOLUSCE программного обеспечения Qgis. На рисунке 4.2 представлены входные данные для алгоритма MOLUSCE. Затем этот алгоритм оценивает изменения площади земель с учетом факторов воздействия и строит модель трансформации землепользования в разных зонах на протяжении двух периодов: 2010-2015 и 2015-2020.

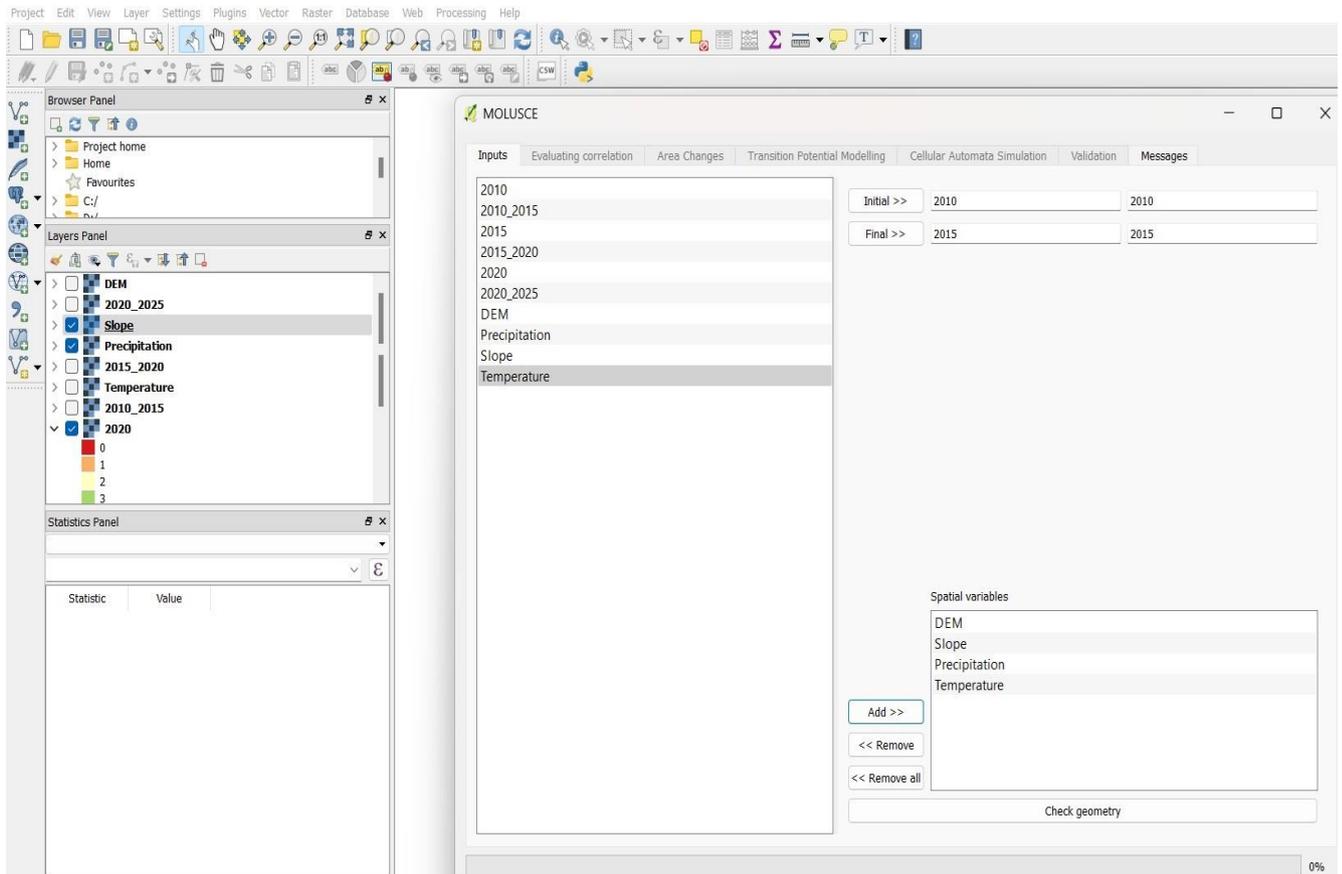


Рисунок 4.2 – Входные данные для алгоритма MOLUSCE

После создания модели трансформации землепользования в период 2010-2015 годов обучена искусственная нейронная сеть на 1000 тестовых выборках и 10 скрытых слоях для подготовки к этапу прогнозирования (рисунок 4.3). Постобученная модель используется для прогнозирования текущего состояния наземного покрова на 2020 год. Карта прогнозируемого состояния наземного покрова на 2020 год загружена в программное обеспечение ArcGIS. Далее площадь каждой категории наземного покрова рассчитана на основе соответствующего количества пикселей (рисунок 4.4). Результаты сравнения прогнозируемой и фактической площадей показаны в таблице 4.5.

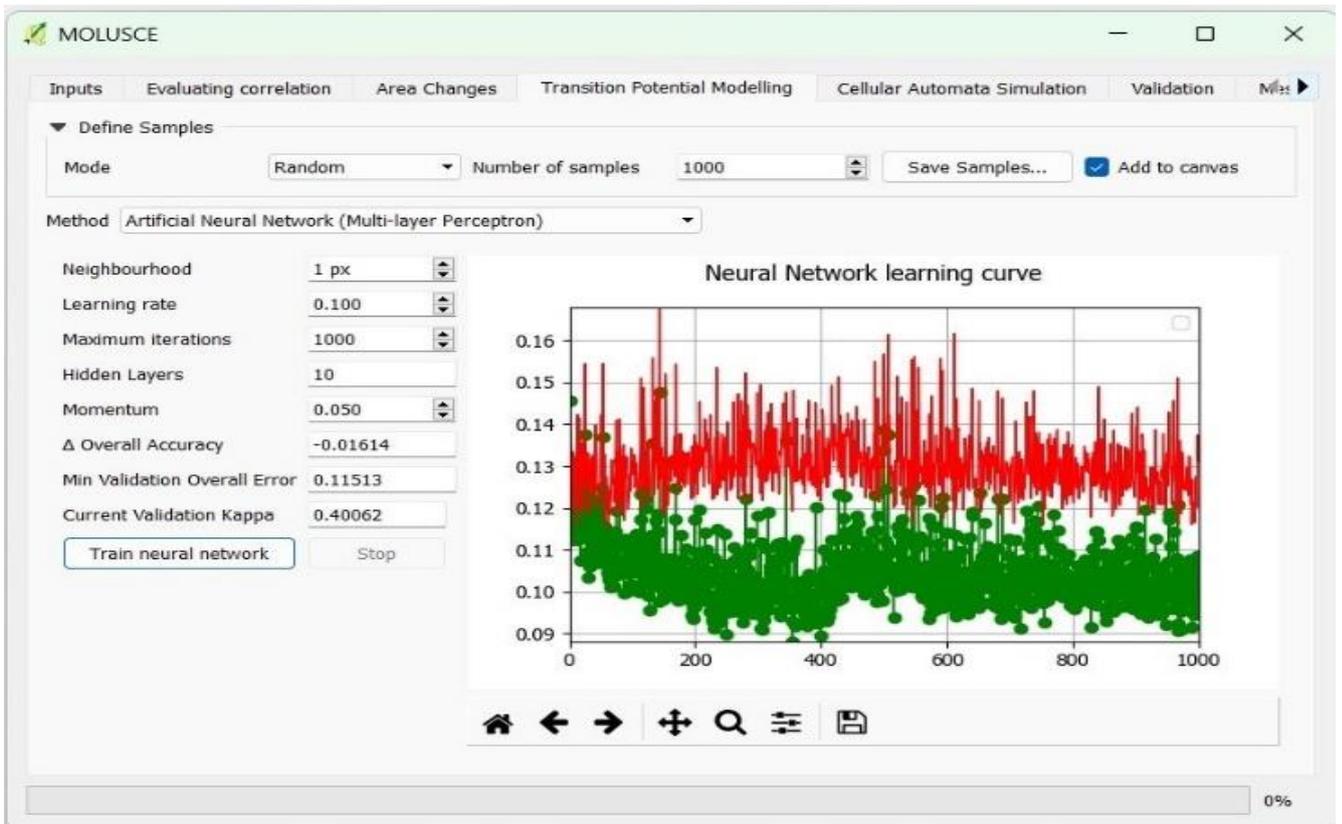


Рисунок 4.3 – Обучение модели прогнозированию состояния наземного покрова с применением алгоритма MOLUSCE

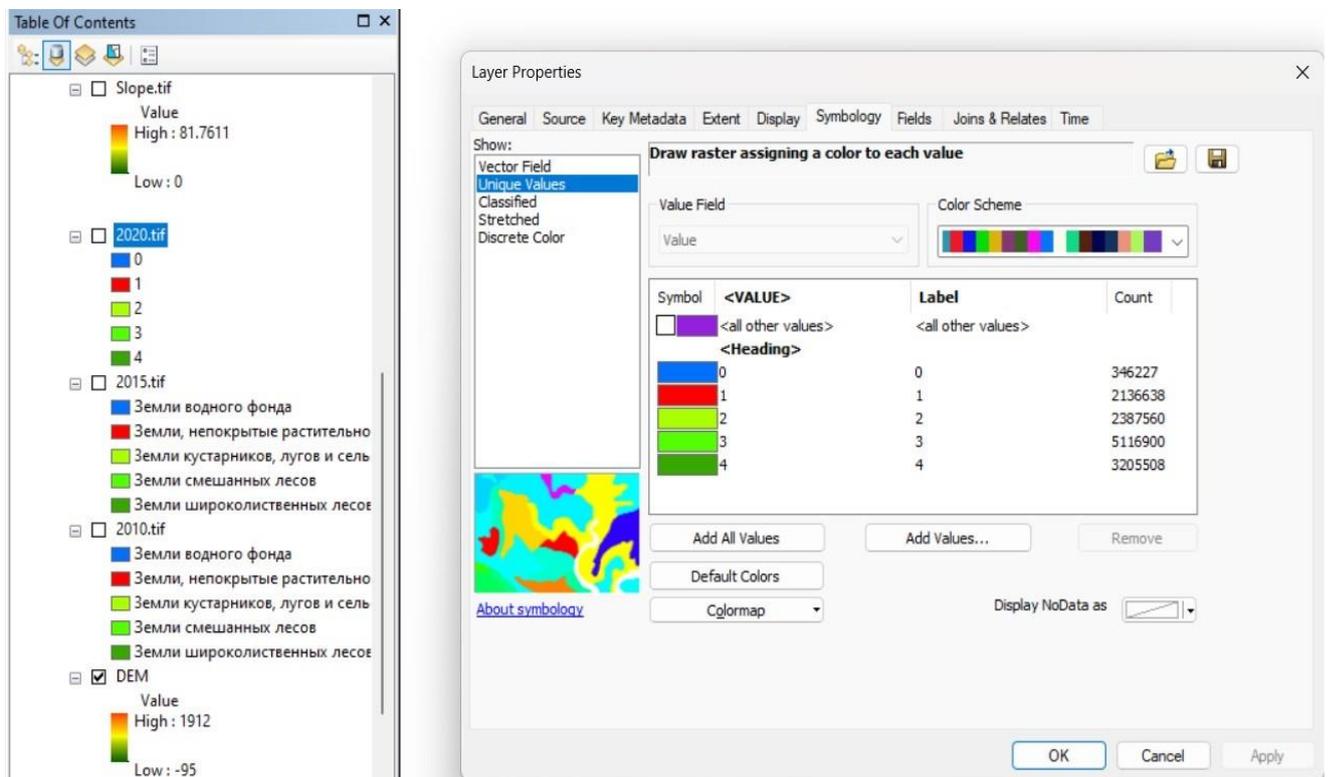


Рисунок 4.4 – Расчет площади категорий наземного покрова по количеству пикселей в программном обеспечении ArcGIS

Таблица 4.5 – Сравнение фактических данных и прогнозных результатов в разных зонах 2020 года (алгоритм MOLUSCE)

Зоны	Категории наземного покрова	Площадь, га		
		По прогнозу	По фактическим данным	Погрешность (%)
Северная	Земли водного фонда	32123	29167	10.13
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	197886	179927	9.98
	Земли смешанных лесов	405687	430246	-5.71
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	189335	200959	-5.78
	Земли широколиственных лесов	266753	269382	-0.97
	Итого	1091784	1109681	-1.61
Центральная	Земли водного фонда	28447	15318	85.71
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	145213	130619	11.17
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	287334	291272	-1.35
	Земли смешанных лесов	420333	424937	-1.08
	Земли широколиственных лесов	98257	106385	-7.64
	Итого	979584	968531	1.14
Южная	Земли водного фонда	60123	49093	22.47
	Земли, непокрытые растительностью и нелесные	115667	103081	12.21
	Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	152290	144871	5.12
	Земли смешанных лесов	167443	190128	-11.93
	Земли широколиственных лесов	105329	103075	2.19
	Итого	600852	590248	1.80

Этот результат сравнения показывает, что использование искусственной нейронной сети ИНС дает более точные результаты прогнозирования, чем модель SA-Markov. Этот результат подкрепляется расчетом значений общей точности  $P_0$  и коэффициента Каппа посредством построения матриц ошибок. На рисунках 4.5 и 4.6 показаны матрицы ошибок, а в таблице 4.6 приведены значения точности результатов прогнозирования по разным алгоритмам. Значение коэффициента Каппа 0,7 алгоритма MOLUSCE с использованием ИНС показывает высокий уровень достоверности прогноза по сравнению со значением 0,59 алгоритма SA-Markov.

На основе данных изменения структуры наземного покрова за период 2015-2020 годов с применением алгоритма MOLUSCE, разработана модель трансформации землепользования для северной, центральной и южной зон. Затем созданы прогнозируемые карты наземного покрова на 2025 год. С использованием данных за 2020 год и прогнозных данных 2025 года, созданы прогнозируемые карты наземного покрова на 2030 год. Результаты представлены на рисунке 4.7. Прогнозируемые площади категорий наземного покрова представлены в таблице 4.7.

### Алгоритм CA-Markov

Категории наземного покрова	Категории наземного покрова					Сумма пикселей (факт)
	1	2	3	4	5	
1 – Земли водного фонда	758	34	44	55	45	936
2- Непокрытые растительностью и нелесные земли	30	2664	628	493	321	4136
3- Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	45	436	4652	722	516	6371
4- Земли смешанных лесов	72	736	1011	7632	1002	10453
5- Земли широколиственных лесов	45	351	622	818	2942	4778
<b>Сумма пикселей (прогноз)</b>	<b>950</b>	<b>4221</b>	<b>6957</b>	<b>9720</b>	<b>4826</b>	<b>26674</b>

Рисунок 4.5 – Построение матриц ошибок по алгоритму CA-Markov

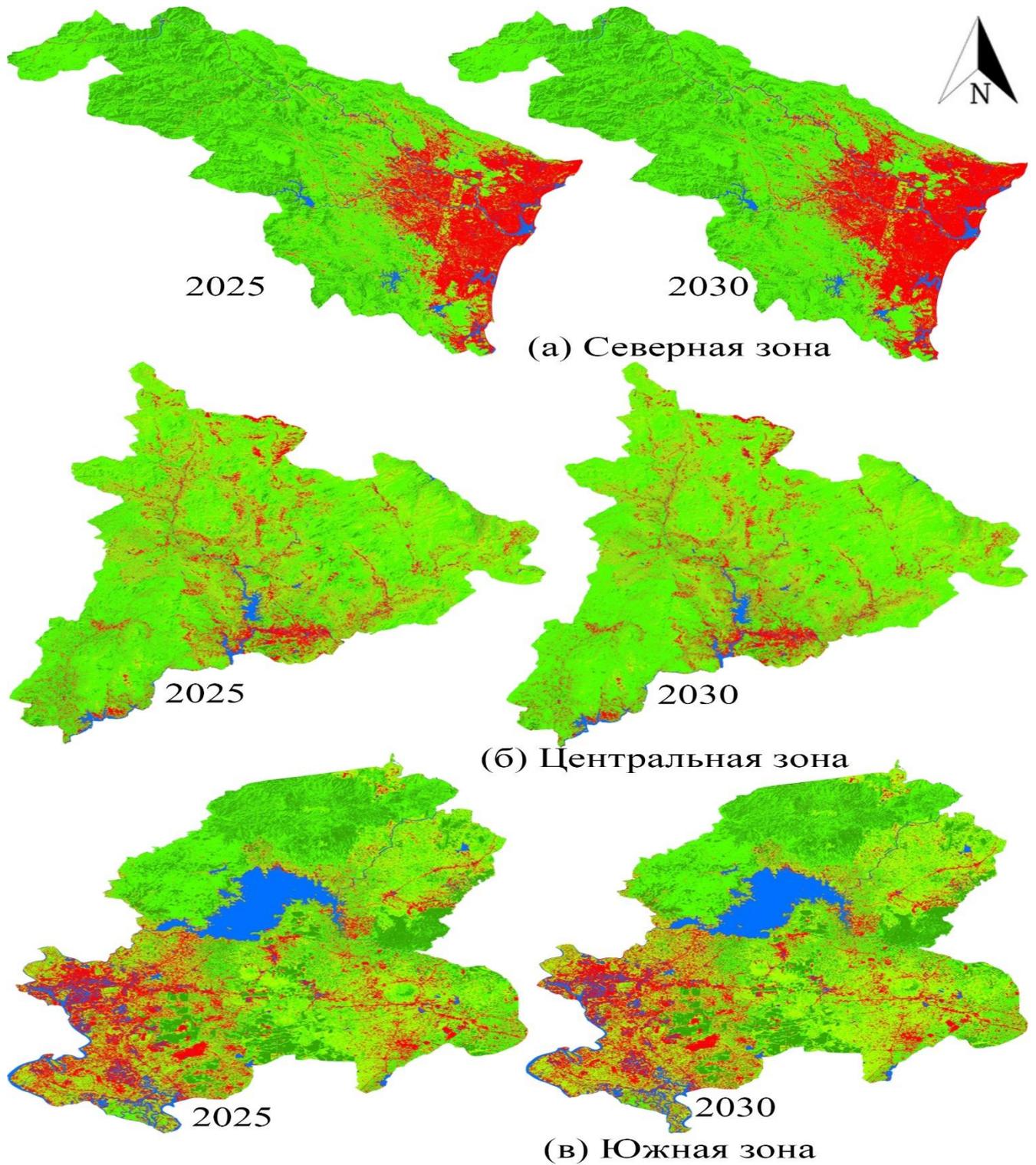
## Алгоритм MOLUSCE

Категории наземного покрова	Категории наземного покрова					Сумма пикселей (факт)
	1	2	3	4	5	
1 – Земли водного фонда	757	32	44	70	33	936
2- Непокрытые растительностью и нелесные земли	28	3057	351	448	252	4136
3- Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	35	403	5033	550	350	6371
4- Земли смешанных лесов	50	482	611	8612	698	10453
5- Земли широколиственных лесов	33	297	401	612	3435	4778
<b>Сумма пикселей (прогноз)</b>	<b>903</b>	<b>4271</b>	<b>6440</b>	<b>10292</b>	<b>4768</b>	<b>26674</b>

Рисунок 4.6 – Построение матриц ошибок по алгоритму MOLUSCE

Таблица 4.6 – Оценка точности результатов прогноза алгоритмов по разным показателям

Показатели точности	Значения по разным алгоритмам	
	CA-Markov	MOLUSCE
P <sub>0</sub> , %	69.9	78.3
Каппа коэффициент	0.59	0.70



Легенда

- Земли водного фонда
- Земли, непокрытые растительностью и нелесные
- Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения
- Земли смешанных лесов
- Земли широколиственных лесов

0 10 20 km  
|-----|-----|

Рисунок 4.7 – Карты прогнозируемого состояния наземного покрова 2025 и 2030 годов в климатических зонах Вьетнама

Таблица 4.7 – Прогнозируемые площадикатегорий наземного покрова в разных зонах Вьетнама

Категории наземного покрова	Площадь по зонам и годам, десятки га								
	Северная			Центральная			Южная		
	2025	2030	Изменение (2020-2030)	2025	2030	Изменение (2020-2030)	2025	2030	Изменение (2020-2030)
Земли водного фонда	2946	2824	-92	1624	1640	+108	4817	4768	-141
Земли, непокрытые растительностью и нелесные	20069	22626	+4633	11921	11347	-1715	9987	9700	-608
Земли кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения	17420	13981	-6114	26669	24212	-4915	16666	18116	+3629
Земли смешанных лесов	44990	47574	+4549	47627	51084	+8590	15937	14218	-4795
Земли широколиственных лесов	25544	23963	-2975	9013	8570	-2068	11618	12224	+1916
Сумма	110968	110968	0	96853	96853	0	59025	59025	0

Исходя из информации, представленной в таблице 4.6, сравнивая с текущим состоянием на 2020 год, видно, что в ожидаемый период с 2020 по 2030 год, в северной зоне, площади земель широколиственных лесов сократятся на 29751 га (11,04%), а кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения на 61145 га (30,43%). Площади земель смешанных лесов увеличатся на 45491 га (10,57%), а непокрытых растительностью и нелесных на 46328 га (25,75%). Это свидетельствует о сильном экономическом развитии в настоящий период, обусловленном тенденцией к продолжению строительства промышленных объектов, а также улучшению инфраструктуры для своевременного удовлетворения потребностей в развитии зоны. Параллельно с этим наблюдается изменение в структуре земель, предназначенных для лесного хозяйства,

поскольку площадь смешанных лесов увеличивается за счёт широколиственных лесов, что противоречит предшествующему 10-летнему периоду. Это можно объяснить изменениями в политике в отношении структуры лесного хозяйства в последние годы и изменениями климата в стране. Для центральной зоны в период с 2020 по 2030 годы ожидается сокращение площади земель кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения на 49149 га (16,87%) и широколиственных лесов на 20683 га (19,44%). Площадь земель смешанных лесов увеличится на 85901 га (20,21%). Это свидетельствует о том, что тенденция уменьшения площади широколиственных лесов за последние 10 лет продолжится, в то время как ситуация с смешанными лесами и землями кустарников, лугов и сельскохозяйственного назначения меняется в противоположном направлении по сравнению с предыдущим периодом. По нашим прогнозам, площадь лугов, кустарников и сельскохозяйственных угодий уменьшится, в то время как площадь смешанных лесов значительно увеличится. Это можно объяснить тем, что политика администрации по восстановлению, охране и защите лесов, а также усилия местного населения на увеличение лесных угодий в последние годы показывают хорошие результаты, что помогают восстановить потерянные площади лесных насаждений, вызванные несанкционированными действиями сельских жителей по захвату лесных участков и вырубкой лесов для заготовки древесины. В южной зоне ожидается увеличение площади лугов, кустарников, сельскохозяйственных угодий на 36286 га (25,05%) и земель широколиственных лесов на 19162 га (18,59%). Площадь смешанных лесов имеет тенденцию к сокращению на 47953 га (25,22%). Эту тенденцию можно объяснить изменением политики, которая в настоящее время продолжает сохранять и развивать первозданные лесные массивы и национальные парки, а также проводит структурные изменения в землепользовании, частично преобразуя земли лесного фонда в сельскохозяйственные угодья, чтобы соответствовать долгосрочным экономическим целям развития зоны.

#### 4.4 Прогноз динамики сомкнутости, полноты и запаса лесных насаждений в разных зонах Вьетнама

##### 4.4.1 Прогноз изменения сомкнутости насаждений Вьетнама

По данным, приведенным в таблице 4.6 с использованием формулы (3.1), вычислены прогнозируемая сомкнутость лесных насаждений в разных зонах на 2025 и 2030 годы (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Прогнозируемые сомкнутости лесных насаждений на 2025 и 2030 годы

Зоны	Категории лесных насаждений	Сомкнутость полога	
		2025	2030
Северная	Смешанные леса	0.41	0.43
	Широколиственные леса	0.23	0.22
	Общая сомкнутость	0.64	0.65
Центральная	Смешанные леса	0.49	0.53
	Широколиственные леса	0.10	0.09
	Общая сомкнутость	0.59	0.62
Южная	Смешанные леса	0.27	0.24
	Широколиственные леса	0.20	0.21
	Общая сомкнутость	0.47	0.45

На основании представленной таблицы видно, что в период с 2020 по 2030 годы в северной зоне наблюдается увеличение сомкнутости смешанных лесов с 0.39 до 0.43 (+0.04) и снижение сомкнутости широколиственных лесов с 0.24 до 0.22 (-0.02). Эти изменения могут быть связаны с активными восстановительными мероприятиями, такими как посадка смешанных пород, и вырубкой зрелых деревьев в широколиственных лесах, что приводит к недостаточному их восполнению. В центральной зоне происходит значительное увеличение сомкнутости смешанных лесов с 0.44 до 0.53 (+0.09) и уменьшение сомкнутости широколиственных лесов с 0.11 до 0.09 (-0.02), а общая сомкнутость лесных насаждений возрастает с 0.55 до 0.62 (+0.07). Это может быть результатом усиленных мер по лесовосстановлению, включая посадку деревьев разных пород для улучшения биоразнообразия, и естественного перехода широколиственных насаждений в разреженные формы из-за изменений климата и хозяйственной деятельности. В южной зоне, напротив, отмечается снижение сомкнутости

смешанных лесов с 0.32 до 0.24 (-0.08) и увеличение сомкнутости широколиственных лесов с 0.17 до 0.21 (+0.04), при этом общая сомкнутость лесных насаждений сокращается с 0.49 до 0.45 (-0.04). Эти изменения могут быть связаны с расширением сельскохозяйственных угодий, строительством и освоением территорий, что приводит к утрате значительной доли смешанных лесов, а также с реализацией проектов по посадке деревьев, акцентированных на широколиственные породы.

#### 4.4.2 Прогноз изменения полноты насаждений

По формуле (3.2), нами составлена таблица прогнозируемой полноты лесных насаждений в разных зонах на 2025 и 2030 годы (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Прогнозируемые полноты лесных насаждений на 2025 и 2030 годы

Зоны	Категории лесных насаждений	Полнота относительная	
		2025	2030
Северная	Смешанные леса	0.46	0.57
	Широколиственные леса	0.34	0.32
	Общая полнота	0.80	0.89
Центральная	Смешанные леса	0.53	0.58
	Широколиственные леса	0.20	0.18
	Общая полнота	0.73	0.76
Южная	Смешанные леса	0.33	0.30
	Широколиственные леса	0.31	0.32
	Общая полнота	0.47	0.45

На основании приведенных данных видно, что в период с 2020 по 2030 годы в северной зоне наблюдается увеличение полноты смешанных лесов с 0.42 до 0.57 (+0.15) и уменьшение полноты широколиственных лесов с 0.35 до 0.32 (-0.03). Эти изменения могут быть вызваны активными мерами по восстановлению смешанных лесов, такими как посадка новых деревьев, что приводит к повышению их полноты, а также вырубкой и строительством промышленных объектов, снижающими полноту широколиственных насаждений. В центральной зоне отмечается значительное увеличение полноты смешанных лесов с 0.51 до 0.58 (+0.07) и уменьшение полноты широколиственных лесов с 0.22 до 0.18 (-0.04). Такое увеличение полноты смешанных лесов может быть связано с проведением лесовосстановительных мероприятий и улучшением условий для

роста деревьев, тогда как снижение полноты широколиственных лесов, вероятно, связано с вырубкой или деградацией этих насаждений, а также с изменением климата и хозяйственной деятельностью. В южной зоне наблюдается снижение полноты смешанных лесов с 0.38 до 0.30 (-0.08) и увеличение полноты широколиственных лесов с 0.27 до 0.32 (+0.05). Такое снижение полноты смешанных лесов, вероятно, вызвано урбанизацией, освоением территорий или естественным разрежением лесных насаждений, тогда как рост полноты широколиственных лесов может быть результатом проектов по восстановлению таких насаждений.

#### 4.4.3 Прогноз изменения запасов древесины

Для расчета прогнозируемых запасов древесины используется формула (3.3). Результаты показаны в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Прогнозируемые запасы древесины на 2025 и 2030 годы

Зоны	Категории лесных насаждений	Запасы, десятки М <sup>3</sup>	
		2025	2030
Северная	Смешанные леса	35992320	38058960
	Широколиственные леса	31929375	29953875
	Общие запасы	67921695	68012835
Центральная	Смешанные леса	40482610	43421230
	Широколиственные леса	12618480	11998280
	Общие запасы	53101090	55419510
Южная	Смешанные леса	15139960	13506625
	Широколиственные леса	17427450	18335550
	Общие запасы	32567410	31842175

По результатам прогноза, за период с 2020 года по 2030 год, в северной зоне, запасы смешанных лесов увеличатся на 36392800 м<sup>3</sup>. Это указывает на успешные восстановительные мероприятия, такие как посадка и уход за лесами, что улучшило их продуктивность. Однако запасы широколиственных лесов снизятся на 37188750 м<sup>3</sup>. Уменьшение запасов широколиственных лесов может быть вызвано их вырубкой, недостаточным уходом и строительством промышленных объектов. В результате общие запасы лесных насаждений сократятся незначительно –795950 м<sup>3</sup>, что указывает на стабильную ситуацию в целом. В центральной зоне запасы смешанных лесов увеличатся на 73015850 м<sup>3</sup>.

Это, вероятно, связано с активными мерами по восстановлению и улучшению лесных экосистем, что повысить их продуктивность. Напротив, запасы широколиственных лесов уменьшатся на 28956200 м<sup>3</sup>. Это снижение может быть вызвано деградацией, вырубкой и изменением структуры лесных массивов. Общие запасы лесных насаждений увеличатся на 44059650 м<sup>3</sup>, что свидетельствует о положительном влиянии восстановительных мероприятий на смешанные леса. В южной зоне запасы смешанных лесов сократятся на 45555350 м<sup>3</sup>. Это может быть следствием урбанизации, вырубки лесов и расширения сельскохозяйственных угодий. Напротив, запасы широколиственных лесов увеличатся на 28743000 м<sup>3</sup>, что указывает на успешные восстановительные мероприятия, направленные на посадку таких лесов. Общие запасы лесных насаждений уменьшатся на 16812350 м<sup>3</sup>, что обусловлено значительным сокращением запасов смешанных лесов.

Таким образом, изменения запасов лесных насаждений тесно связаны с динамикой их полноты и сомкнутости, которые зависят от природных условий, хозяйственной деятельности и мероприятий по восстановлению лесов. Зоны с акцентом на восстановление демонстрируют рост продуктивности смешанных или широколиственных лесов, в то время как деградация приводит к снижению запасов.

#### **4.5 Выводы по главе 4**

По результатам прогнозирования оценочных показателей насаждений на ближайшую перспективу можно сделать следующие выводы:

1. Приведены результаты прогнозирования состояния земель лесного фонда на 2025 и 2030 годы с использованием алгоритмов CA-Markov и MOLUSCE, причём MOLUSCE продемонстрировал более высокую точность, что подтверждает его эффективность для мониторинга и управления лесными ресурсами во Вьетнаме. Моделирование выполнено на основе обработки космоснимков Landsat 7, 8, Sentinel 2, что позволило учесть влияние географического положения на динамику лесных угодий. В северной зоне

ожидается сокращение площадей кустарников, лугов и сельскохозяйственных земель на 61145 га (-30,43%), и широколиственных лесов на 29751 га (-11,04%), при этом площади смешанных лесов увеличатся на 45491 га (+10,57%), а нелесных территорий – на 46328 га (+25,75%), что связано с экономическим развитием региона и изменениями в лесной политике. В центральной зоне прогнозируется уменьшение площадей сельскохозяйственных угодий на 49149 га (-16,87%) и широколиственных лесов на 20683 га (-19,44%), в то время как площади смешанных лесов увеличатся на 85901 га (+20,21%), что объясняется успешными восстановительными мерами и борьбой с незаконной вырубкой. Для южной зоны предполагается рост площадей широколиственных лесов на 19162 га (+18,59%) и сельскохозяйственных земель на 36286 га (+25,05%), при одновременном сокращении смешанных лесов на 47953 га (-25,22%), что обусловлено сохранением национальных парков и изменением структуры землепользования в интересах долгосрочных экономических целей. Точность прогнозов, подтверждённая коэффициентом Каппа в диапазоне 0,72–0,78, позволяет разработать устойчивые стратегии управления, восстановления и сохранения лесных ресурсов Вьетнама.

2. Результаты прогноза динамики остальных оценочных показателей лесных насаждений показывают, что за период с 2020 года по 2030 год в северной зоне запасы смешанных лесов увеличатся на 36392800 м<sup>3</sup>, что связано с ростом их полноты (+0.15) и сомкнутости (+0.04). Это указывает на успешные восстановительные мероприятия. Запасы широколиственных лесов снизятся на 37188750 м<sup>3</sup> из-за снижения полноты (-0.03) и сомкнутости (-0.02). Это уменьшение может быть вызвано вырубкой и строительством промышленных объектов. В результате общие запасы лесных насаждений сократятся незначительно – 795950 м<sup>3</sup>, что указывает на стабильную ситуацию в целом. В центральной зоне запасы смешанных лесов увеличатся на 73015850 м<sup>3</sup>, при этом полнота возрастет на 0.07, а сомкнутость – 0.09, что связано с эффективными восстановительными мероприятиями лесных экосистем. Напротив, запасы широколиственных лесов уменьшатся на 28956200 м<sup>3</sup>, что связано с уменьшением

их полноты (-0.04) и сомкнутости (-0.02) из-за вырубki и изменения структуры лесных массивов. Общий прирост запасов составит 44059650 м<sup>3</sup>, что свидетельствует о положительном влиянии восстановления смешанных лесов. В южной зоне запасы смешанных лесов сократятся на 4555350 м<sup>3</sup> вследствие снижения полноты и сомкнутости на 0.08, что связано с урбанизацией, вырубкой лесов и расширением сельскохозяйственных угодий. Напротив, запасы широколиственных лесов увеличатся на 28743000 м<sup>3</sup> благодаря росту полноты на 0.05 и сомкнутости на 0.04, что объясняется восстановительными мероприятиями. Общие запасы лесов уменьшатся на 16812350 м<sup>3</sup> из-за значительного сокращения запасов смешанных лесов. Таким образом, изменения запасов лесов связаны с динамикой полноты и сомкнутости, обусловленной природными условиями, хозяйственной деятельностью и восстановительными усилиями. Зоны, активно внедряющие восстановительные меры, показывают рост продуктивности лесных насаждений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертация предлагается использовать данные дистанционного зондирования Земли для повышения достоверности оценки состояния земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Выявлены недостатки инвентаризации земель глазомерно-измерительным методом, изучены современные технологии мониторинга в зарубежных странах, выявлены преимущества ДЗЗ с использованием ГИС по сравнению с наземным исследованием земель.

2. Сложный рельеф и климат влияют на формирование типов почв, которые обеспечивают физическую и питательную основу растениям, способствуют формированию таксационных (оценочных) показателей насаждений. Однако ключевым фактором, определяющим структуру, породный состав и трансформацию лесов, остаётся климат.

3. Проведено климатическое зонирование Вьетнама по методу Х. Патерсона. Выделенные зоны отражают природные особенности экосистем: состав древостоев, классы напочвенного покрова и оценочные показатели насаждений. По климатическим условиям разработана программа для ЭВМ по вычислению солнечной радиации, которая ускоряет увеличение оценочных показателей насаждений с учетом широты местности.

4. Разработаны тематические карты состояния земель лесного фонда за период 2010-2020 г. Согласованность результатов исследований и фактические данные лесного фонда имеют высокие значения коэффициента Каппа (0.81 - 0.88).

5. Оценочные показатели насаждений за период 2010-2020 г претерпели также изменения. В северной зоне полнота смешанных лесов снизилась на 16,0%, а сомкнутость — на 18,8%, тогда как в широколиственных лесах отмечено увеличение полноты на 40,0%, сомкнутости — на 50,0%, что способствовало увеличению запаса древесины на 29,5 млн м<sup>3</sup>. В центральной зоне отмечено снижение полноты как в смешанных лесах на 8,9%, и в широколиственных — на

12,0%. Сомкнутость уменьшилась соответственно на 4,3% и 21,4%. Из-за вырубki древостоев и низкого восстановительного процесса сократились запасы древесины на 54,8 млн м<sup>3</sup>. В южной зоне отмечено увеличение полноты смешанных лесов на 15,2%, а широколиственных — на 12,5%, сомкнутость возросла соответственно на 10,3% и 21,4%, запасы древесины увеличились – на 54,5 млн м<sup>3</sup> благодаря эффективным мерам по искусственному восстановлению вырубок.

6. Для прогноза состояния земель лесного фонда Вьетнама применены алгоритмы MOLUSCE с использованием искусственной нейронной сети и CA-Markov. В результате исследований рекомендуется использовать алгоритм MOLUSCE, который обеспечивает более высокую точность прогноза: значение коэффициента Каппа достигает 0,70, что соответствует уровню «существенное» согласие. В то время как для алгоритма CA-Markov коэффициент Каппа составляет 0,59, что соответствует уровню «умеренное» согласие.

7. Все поставленные задачи по исследованию земель лесного фонда решены полностью. Результаты исследования внедрены в хозяйственную деятельность ООО «Nguon Viet» Вьетнама для эффективного управления лесными ресурсами Социалистической республики Вьетнам. Результаты исследования явились основой национального проекта «Образование и информирование о важности лесного фонда» с целью повышения осведомленности граждан Вьетнама о роли лесов и организации образовательных учреждений с использованием интерактивных карт и данных дистанционного зондирования.

На основе полученных научных результатов в дальнейшем следует интегрировать данные с различных спутников (Landsat, PlanetScope, Sentinel и др.) для получения более точной информации о структуре леса, а также разработать национальную ГИС-платформу, объединяющую базу данных лесного фонда, климатические данные, данные дистанционного зондирования, а также механизмы взаимодействия с органами власти и населением для мониторинга изменений земель лесного фонда в режиме реального времени и принятия обоснованных управленческих решений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Данг, Т. Л. А. Мониторинг земель особо охраняемых природных территорий Социалистической Республики Вьетнам для прогнозирования состояния ландшафтов: специальность 25.00.26 «Землеустройство, кадастр и мониторинг земель»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т. Л. А. Данг; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2021. – 145 с. – Библиогр.: с. 92–108. – Текст: электронный (дата обращения: 20.02.2025).

2. Ковязин, В. Ф. Мониторинг земельных ресурсов Социалистической Республики Вьетнам / В. Ф. Ковязин, А. Н. Козодаев, Т. С. Нгуен, Т. Л. А. Данг. – Санкт-Петербург : Издательство "Лань", 2022. – 164 с. – ISBN 978-5-8114-9111-7. – Текст: непосредственный (дата обращения: 20.02.2025).

3. Ковязин, В. Ф. Оценка точности инвентаризации лесных земель с применением воздушного лазерного сканирования / В. Ф. Ковязин, О. А. Пасько, О. Ю. Лепихина, В. Е. Трушников // Геодезия и картография. – 2022. – № 6-83. – Р. 54-63. – URL: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63> (дата обращения: 20.02.2025).

4. Ковязин, В.Ф. Dynamics of lands area of the biosphere reserve Can Gio of Vietnam / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, Т.Л.А. Данг, Т.Ч. Нгуен. Сборник материалов международной научно-практической конференции «Наука, бизнес, государство». Изд-во Национальный информационный канал, СПб. - 2023. - С. 189-193. – URL: [http://noironline.ru/files/Пасько/Научный%20сборник%20НОИ%20СПБ\\_2-2023.pdf](http://noironline.ru/files/Пасько/Научный%20сборник%20НОИ%20СПБ_2-2023.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

5. Ковязин, В.Ф. Выделение лесных угодий провинции Кон Тум Вьетнама по вегетационным индексам / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, Т.Ч. Нгуен, Т.А. Ву // Наука и технологии в лесопромышленном комплексе : сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 20–21 июля 2023 года. – Брянск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный инженерно-

технологический университет". - 2023. – С. 142-147. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_54248172\\_78003671.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54248172_78003671.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

6. Ковязин, В.Ф. Динамика земель лесного фонда провинции Донг Най Вьетнама / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, Т.Ч. Нгуен // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение : Сборник научных трудов по материалам III национальной научно-практической конференции, Омск, 24 ноября 2022 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина. - 2022. – С. 157-160. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_50248820\\_48064553.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50248820_48064553.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

7. Ковязин, В.Ф. Инвентаризация лесного фонда с применением беспилотного аэрофотосъемочного комплекса / В.Ф. Ковязин, Е.М. Лоос, А.С. Кудрявцев, **Ч.А. Нгуен** // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: Материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 01–14 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет. - 2024. – С. 217-222. – URL: [https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/12972/1/NTM\\_24\\_047.pdf](https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/12972/1/NTM_24_047.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

8. Ковязин, В.Ф. Мониторинг земель лесного фонда провинции Тхань Хоа Вьетнама / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, Т.Ч. Нгуен // Интеграция науки, производства и образования в современном мире : Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 16–17 января 2023 года. – Санкт-Петербург: Национальный информационный канал. - 2023. – С. 107-112. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_50750493\\_85923440.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50750493_85923440.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

9. Ковязин, В.Ф. Оценка состояния лесного фонда провинции Донг Най Вьетнама по данным дистанционного зондирования Земли / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен** // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. –

2024. – № 1 (68). – С. 73-83. – URL: <https://doi.org/10.30533/GiA-2024-006> (дата обращения: 20.02.2025).

10. Ковязин, В.Ф. Оценка состояния лесного фонда провинции Тхань Хоа Вьетнама по вегетационным индексам / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен** // Вестник МИИГАиК : Сборник научных статей 79-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках Международной Студенческой Недели Науки СНН-2024, Москва, 08–12 апреля 2024 года. – Москва: Московский государственный университет геодезии и картографии. - 2024. – С. 139-148. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_75091322\\_24737832.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_75091322_24737832.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

11. Ковязин, В.Ф. Породный состав лесного фонда Вьетнама / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, Т.Ч. Нгуен, Ч.К. Фам // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2023. – № 63. – С. 49-53. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_53713005\\_43498361.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_53713005_43498361.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

12. Ковязин, В.Ф. Разработка методики инвентаризации земель лесного фонда с применением беспилотного воздушного судна на примере Магдагачинского лесничества Амурской области / В.Ф. Ковязин, О.А. Пасько, Е.М. Лоос, **Ч.А. Нгуен** // Геодезия и картография. – 2024. – № 7 (85). – С. 34-45. – URL: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1009-7-34-45> (дата обращения: 20.02.2025).

13. Ковязин, В.Ф. Состояние мониторинга и мероприятия по снижению истощения лесных ресурсов Социалистической Республики Вьетнам / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, Т.Л.А. Данг, Т.Ч. Нгуен // Наука, бизнес, производство: вызовы и решения : Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Национальный информационный канал. - 2024. – С. 123-129. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_80313058\\_34473092.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_80313058_34473092.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

14. Ковязин, В.Ф. Формирование лесорастительных зон Вьетнама по методике Х. Патерсона / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, Т.Ч. Нгуен // Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК : Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся, Санкт-Петербург - Пушкин, 15–17 марта 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. - 2023. – С. 608-612. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_54131697\\_73492410.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54131697_73492410.pdf) (дата обращения: 20.02.2025).

15. Нгуен, Т. С. Мониторинг земельных угодий Социалистической Республики Вьетнам для их кадастрового учёта в условиях изменяющихся рыночных отношений: специальность 25.00.26 «Землеустройство, кадастр и мониторинг земель»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т. С. Нгуен; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2020. – 162 с. – Библиогр.: с. 104–117. – Текст: электронный (дата обращения: 20.02.2025).

16. **Нгуен, Ч.А.** Прогноз состояния земель лесного фонда Вьетнама по данным дистанционного зондирования / Ч.А. Нгуен // Управление объектами недвижимости и комплексное развитие территорий : сборник статей IV Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 06–07 февраля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. - 2025. – С. 224-233. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_80955223\\_90298745.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_80955223_90298745.pdf) (дата обращения: 20.05.2025).

17. Обзор возможностей индекса NDVI :электронная газета: сайт. – Москва, 2020 - . – URL: <https://aeromotus.ru/obzor-vozmozhnostej-indeksa-ndvi/> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667639 Российская Федерация. Программа для ЭВМ по вычислению прямой и рассеянной солнечной радиации по входным данным широты местности и

времени наблюдений : № 2024666225 : заявл. 15.07.2024 : опубл. 26.07.2024 / В.Ф. Ковязин, **Ч.А. Нгуен**, А.В. Зубов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 2024. – 1 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69588481> (дата обращения: 20.02.2025).

19. Abdollahnejad, A. An Integrated GIS and Remote Sensing Approach for Monitoring Harvested Areas from Very High-Resolution, Low-Cost Satellite Images / A. Abdollahnejad, D. Panagiotidis, L. Bílek // *Remote Sensing*. – 2019. – № 21-11. – P. 2539. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs11212539> (дата обращения: 20.02.2025).

20. Aksoy, H. Monitoring of land use/land cover changes using GIS and CA-Markov modeling techniques: a study in Northern Turkey / H. Aksoy, S. Kaptan // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2021. – № 193. – P. 507. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09281-x> (дата обращения: 20.02.2025).

21. Al Mazroa, A. An analysis of urban sprawl growth and prediction using remote sensing and machine learning techniques / A. Al Mazroa, M. Maashi, F. Kouki, K. M. Othman, N. Salih, M. A. Elfaki, S. B. S // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2024. – № 142. – P. 104988. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104988> (дата обращения: 20.02.2025).

22. Alabi, K. Forest cover change in Onigambari reserve, Ibadan, Nigeria: Application of vegetation index and Markov chain techniques / K. Alabi, A. Tobore, G. Oyerinde, B. Senjobi // *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. – 2021. – № 3-24. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.004> (дата обращения: 20.02.2025).

23. Alam, N. Prediction modelling of riverine landscape dynamics in the context of sustainable management of floodplain: a geospatial approach / N. Alam, S. Saha, S. Gupta, S. Chakraborty // *Annals of GIS*. – 2021. – № 3-27. – P. 299-314. – URL: <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1870558> (дата обращения: 20.02.2025).

24. Alaniz, A. J. Remote-sensing estimates of forest structure and dynamics as indicators of habitat quality for Magellanic woodpeckers / A. J. Alaniz, M. A. Carvajal,

A. Fierro, V. Vergara-Rodríguez, G. Toledo, D. Ansaldo, D. Moreira-Arce, A. Rojas-Osorio, P. M. Vergara // *Ecological Indicators*. – 2021. – № 107634. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107634> (дата обращения: 20.02.2025).

25. Ali, A. An intelligent computing methodology for two-phase flow performance assessment of electrical submersible pump using artificial neural network and synthetic minority over-sampling technique / A. Ali, J. Yuan, S. Iqbal, Q. Si, S. M. R. S. Naqvi, S. Hussain, F. Shah, E. S. Ghith, K. Saleem // *Measurement*. – 2024. – P. 116512. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116512> (дата обращения: 20.02.2025).

26. Bai, J. B. Rapid prediction of mechanical properties during composite curing using artificial neural network and multi-objective genetic algorithms / J. B. Bai, G. Y. Bu, Z. Z. Wang, P. C. Cao, X. Q. Li, S. X. Guo, T. W. Liu // *Composite Structures*. – 2024. – P. 118809. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118809> (дата обращения: 20.02.2025).

27. [bandovietnamkholongiare.blogspot.com](http://bandovietnamkholongiare.blogspot.com): Карта среднегодового количества осадков Социалистической Республики Вьетнам: сайт. – Ханой, 2017 - . – URL: <https://bandovietnamkholongiare.blogspot.com/2017/08/ban-o-thong-tin-ve-luong-tua.html> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

28. Вақа, М. F. Monitoring and Modeling the Patterns and Trends of Urban Growth Using Urban Sprawl Matrix and CA-Markov Model: A Case Study of Karachi, Pakistan / М. F. Вақа, S. Wang, S. Qureshi // *Land*. – 2021. – № 7-10. – P. 700. – URL: <https://doi.org/10.3390/land10070700> (дата обращения: 20.02.2025).

29. Beaudoin, A. Improved k-NN Mapping of Forest Attributes in Northern Canada Using Spaceborne L-Band SAR, Multispectral and LiDAR Data / A. Beaudoin, R. J. Hall, G. Castilla [et al.] // *Remote Sensing*. – 2022. – № 14. – P. 1181. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs14051181> (дата обращения: 20.02.2025).

30. Bykova, E. Automation of Negative Infrastructural Externalities Assessment Methods to Determine the Cost of Land Resources Based on the Development of a "Thin Client" Model / E. Bykova, I. Raguzin, M. Skachkova // *Sustainability*. – 2022. –

№ 15-14. – P. 9383. – URL: <https://doi.org/10.3390/su14159383> (дата обращения: 20.02.2025).

31. Bykova, E. Modeling the Cadastral Value of Land Plots of Gardening and Horticultural Non-Profit Partnerships Taking into Account the Influence of Local Factors of the Territory / E. Bykova, T. Banikevich, N. Zalivatskaya, O. Pirogova // *Land*. – 2024. – № 7-13. – P. 1004. – URL: <https://doi.org/10.3390/land13071004> (дата обращения: 20.02.2025).

32. Camarretta, N. Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches / N. Camarretta, P. Harrison, T. Bailey, B. Potts, A. Lucieer, N. Davidson, M. Hun // *New Forests*. – 2020. – № 51. – P. 573–596. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09754-5> (дата обращения: 20.02.2025).

33. Dang, N. Q. H. Nghiên cứu sự thay đổi lớp phủ thảm thực vật tại Vườn Quốc gia Bạch Mã, tỉnh Thừa Thiên Huế / N. Q. H. Dang // *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp*. – 2010. – URL: <https://vafs.gov.vn/vn/nghien-cuu-su-thay-doi-lop-phu-tham-thuc-vat-tai-vuon-quoc-gia-bach-ma-tinh-thua-thien-hue> (дата обращения: 20.02.2025).

34. Devanatham, A. Assessment of land use and land cover change detection and prediction using remote sensing and CA-Markov in the northern coastal districts of Tamil Nadu, India A. Devanatham, S. Subbarayan // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2022. – № 29. – P. 86055–86067. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15782-6> (дата обращения: 20.02.2025).

35. Dinh, D. B. Free satellite image data application for monitoring land use cover changes in the Kon ha nung plateau, Vietnam / D. B. Dinh, D. T. Ngo, H. D. Nguyen, H. H. V. Nguyen, N. T. Dang // *Heliyon*. – 2023. – № 1-9. – P. e12864. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12864> (дата обращения: 20.02.2025).

36. Duwe, V. K. Contributions to the biodiversity of Vietnam – Results of VIETBIO inventory work and field training in Cuc Phuong National Park / V. K. Duwe, L. Van Vu, T. von Rintelen et al. // *Biodiversity Data Journal*. – 2022. – № 10. P. e77025. – URL: <https://doi.org/10.3897/BDJ.10.e77025> (дата обращения: 20.02.2025).

37. Eorc.jaxa.jp: Изучение структуры рельефа со снимком ALOS-2 - Журнал «Advanced Land Observing Satellite» от 16.08.2020 г.: сайт. – URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

38. Etemadi, H. Land use change assessment in coastal mangrove forests of Iran utilizing satellite imagery and CA–Markov algorithms to monitor and predict future change / H. Etemadi, J. M. Smoak, J. Karami // *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – № 77. – P. 208. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7392-8> (дата обращения: 20.02.2025).

39. Foody, G. M. Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification / G. M. Foody // *Remote Sensing of Environment*. – 2020. – № 239. – P. 111630. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630> (дата обращения: 20.02.2025).

40. Fouedjio, F. Classification random forest with exact conditioning for spatial prediction of categorical variables / F. Fouedjio // *Artificial Intelligence in Geosciences*. – 2021. – № 2. – P. 82-95. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.aiig.2021.11.003> (дата обращения: 20.02.2025).

41. Fragou, S. Quantifying Land Cover Changes in a Mediterranean Environment Using Landsat TM and Support Vector Machines / S. Fragou, P. Louka, S. Karpouzas [et al.] // *Forests*. – 2020. – № 7-11. – P. 750. – URL: <https://doi.org/10.3390/f11070750> (дата обращения: 20.02.2025).

42. Gašparović, M. Effect of fusing Sentinel-2 and WorldView-4 imagery on the various vegetation indices / M. Gašparović, L. Rumora, M. Miler, D. Medak // *Journal of Applied Remote Sensing*. – 2019. – № 3-13. – P. 1. – URL: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.036503> (дата обращения: 20.02.2025).

43. Gholami Baghi, N. Do soil-adjusted or standard vegetation indices better predict above ground biomass of semi-arid, saline rangelands in North-East Iran? / N. Gholami Baghi, J. Oldeland // *International Journal of Remote Sensing*. – 2019. – №

2-40. – P. 1-13. – URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1606958> (дата обращения: 20.02.2025).

44. Girma, R. Land use land cover change modeling by integrating artificial neural network with cellular Automata-Markov chain model in Gidabo river basin, main Ethiopian rift / R. Girma, C. Fürst, A. Moges // *Environmental Challenges*. – 2022. – № 6. – P. 100419. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100419> (дата обращения: 20.02.2025).

45. Gong, Z. Satellite remote sensing of vegetation phenology: Progress, challenges, and opportunities / Z. Gong, W. Ge, J. Guo, J. Liu // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2024. – № 217. – P. 149–164. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.08.011> (дата обращения: 20.02.2025).

46. Guimarães, N. Forestry Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities / N. Guimarães, L. Pádua, P. Marques [et al.] // *Remote Sensing*. – 2020. – № 6-12. – P. 1046. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12061046> (дата обращения: 20.02.2025).

47. Gutierrez Garzon, A. R. A Comparative Analysis of Five Forest Certification Programs / A. R. Gutierrez Garzon, P. Bettinger, J. Siry, J. Abrams, C. Cieszewski, K. Boston, B. Mei, H. Zengin, A. A. Yeşil // *Forests*. – 2020. – № 8-11. – P. 863. – URL: <https://doi.org/10.3390/f11080863> (дата обращения: 20.02.2025).

48. Hartley, R. J. L. An Assessment of High-Density UAV Point Clouds for the Measurement of Young Forestry Trials / R. J. L. Hartley, E. M. Leonardo, P. Massam, M. S. Watt, H. J. Estarija, L. Wright, N. Melia, G. D. Pearse // *Remote Sensing*. – 2020. – № 24-12. – P. 4039. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12244039> (дата обращения: 20.02.2025).

49. He, X. The relationship between acoustic indices, vegetation, and topographic characteristics is spatially dependent in a tropical forest in southwestern China / X. He, Y. Deng, A. Dong, L. Lin // *Ecological Indicators*. – 2022. – № 2-142. – P. 109229. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109229> (дата обращения: 20.02.2025).

50. Heiselberg, P. Ship velocity estimation in SAR images using multitask deep learning / P. Heiselberg, K. Sørensen, H. Heiselberg // *Remote Sensing of Environment*.

– 2023. – № 288. – P. 113492. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113492> (дата обращения: 20.02.2025).

51. Heydari, H. An investigation of drought prediction using various remote-sensing vegetation indices for different time spans / H. Heydari, M. Valadan Zoej, Y. Maghsoudi // *International Journal of Remote Sensing*. – 2018. – № 6-39. – P. 1871–1889. – URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1416696> (дата обращения: 20.02.2025).

52. Hoidap247.com: Карта среднегодовой температуры Социалистической республики Вьетнам: сайт. – Ханой, 2023 - . – URL: <https://hoidap247.com/cau-hoi/3860830> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

53. Hou, W. Evolutionary trends and analysis of the driving factors of *Ulva prolifera* green tides: A study based on the random forest algorithm and multisource remote sensing images / W. Hou, J. Chen, M. He, S. Ren, L. Fang, C. Wang, P. Jiang, W. Wang // *Marine Environmental Research*. – 2024. – № 198. – P. 106495. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106495> (дата обращения: 20.02.2025).

54. Hu, T. Mapping the Global Mangrove Forest Aboveground Biomass Using Multisource Remote Sensing Data / T. Hu, Y. Zhang, Y. Su, Y. Zheng, G. Lin, Q. Guo // *Remote Sensing*. – 2020. – № 10-12. – P. 1690. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12101690> (дата обращения: 20.02.2025).

55. Hyndavi, A. Evolution of value addition process for generation of Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) product – A case study / A. Hyndavi, L. James, R. V. G. Anjaneyulu, S. Suresh, R. C. Venkateswara, V. M. Bothale // *2019 IEEE Recent Advances in Geoscience and Remote Sensing: Technologies, Standards and Applications (TENGARSS)*. – 2019. – P. 86-91. – URL: <http://doi.org/10.1109/TENGARSS48957.2019.8976035> (дата обращения: 20.02.2025).

56. Jacques, R. Herbivory and flooding impacts on planted bottomland hardwood seedlings / R. Jacques, J. Stovall, C. Comer // *Forestry*. – 2022. – № 95. – P. 215–228. – URL: <https://doi.org/10.1093/forestry/crab043> (дата обращения: 20.02.2025).

57. Jiang, G. Remote Sensing Recognition and Classification of Forest Vegetation Based on Image Feature Depth Learning / G. Jiang, Q. Zheng // *Mobile Information Systems*. – 2022. – Article ID 9548552. – 11 p. – URL: <https://doi.org/10.1155/2022/9548552> (дата обращения: 20.02.2025).

58. Jiang, R. Estimation of soil organic carbon by combining hyperspectral and radar remote sensing to reduce coupling effects of soil surface moisture and roughness / R. Jiang, Y. Sui, X. Zhang, N. Lin, X. Zheng, B. Li, L. Zhang, X. Li, H. Yu // *Geoderma*. – 2024. – № 444. – P. 116874. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116874> (дата обращения: 20.02.2025).

59. Jin, H. Fusion of optical, radar and waveform LiDAR observations for land cover classification / H. Jin, G. Mountrakis // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2022. – № 187. – P. 171–190. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.010> (дата обращения: 20.02.2025).

60. Jurjević, L. Is field-measured tree height as reliable as believed – Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote sensing in a deciduous forest / L. Jurjević, X. Liang, M. Gašparović, I. Balenović // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2020. – № 9-169. – P. 227–241. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.014> (дата обращения: 20.02.2025).

61. Kamenova, I. Evaluation of Sentinel-2 vegetation indices for prediction of LAI, fAPAR and fCover of winter wheat in Bulgaria / I. Kamenova, P. Dimitrov // *European Journal of Remote Sensing*. – 2020. – № 1-54. – P. 89-108. – URL: <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1839359> (дата обращения: 20.02.2025).

62. Kanjin, K. Assessing changes in land cover, NDVI, and LST in the Sundarbans mangrove forest in Bangladesh and India: A GIS and remote sensing approach / K. Kanjin, M. B. Alam // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2024. – № 36. – P. 101289. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101289> (дата обращения: 20.02.2025).

63. Katrandzhiev, K. Whole System Data Integration for Condition Assessments of Climate Change Impacts: An Example in High-Mountain Ecosystems in Rila

(Bulgaria) / K. Katrandzhiev, K. Gocheva, S. Bratanova-Doncheva // Diversity. – 2022. – № 4-14. – P. 240. – URL: <https://doi.org/10.3390/d14040240> (дата обращения: 20.02.2025).

64. Khan, A. A Multiview Semantic Vegetation Index for Robust Estimation of Urban Vegetation Cover / A. Khan, W. Asim, A. Ulhaq, R. W. Robinson // Remote Sensing. – 2022. – № 1-14. – P. 228. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs14010228> (дата обращения: 20.02.2025).

65. Kovyazin, V. Application of Remote Sensing and GIS in Monitoring Forest Cover Changes in Vietnam Based on Natural Zoning / V. Kovyazin, A. **Nguyen**, C. Pham // Land. – 2025. – № 5-14. – P. 1037. – URL: <https://doi.org/10.3390/land14051037> (дата обращения: 20.05.2025).

66. Kovyazin, V. Zoning of Vietnam's Forest Fund Based on Climatic Conditions and Organic Mass Growth for Environmental Improvement / V. Kovyazin, A. Nguyen, A. Zubov // Ecological Aspects of Soil and Land Preservation. – 2024. – Chapter 3. – ISBN: 979-8-3693-3374-7. – URL: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3374-7> (дата обращения: 20.02.2025).

67. Kovyazin, V.F. Monitoring the forest fund lands of Kon Tum province, Vietnam using remote sensing data of Earth / V.F. Kovyazin, T.A. **Nguyen**, T.T. Nguyen // Geodesy and cartography = Geodezia i Kartografia. - 2023. - № 8-84. – P. 57-64. – URL: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2023-998-8-57-64> (дата обращения: 20.02.2025).

68. Kovyazin, V.F. Problems of forest resources management in the Arctic zone of the Russian Federation / V.F. Kovyazin, O.Yu. Lepikhina, P.M. Demidova, O.A. Kolesnik, S.O.R. Shobairi, T.A. **Nguyen** // Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal. – 2023. - № 3-393. - P. 185-194. – URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-185-194> (дата обращения: 20.02.2025).

69. Kurbanov, E. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China / E. Kurbanov, O. Vorobev, J. Sha, X. Li, I. Gitas, H. Minakou, A. Gabdelkhakov, M. V. Martynova // Sovremennye problemy

distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2020. – № 17. – P. 9-20. – URL: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-9-20> (дата обращения: 20.02.2025).

70. Laar, C. Assessing the impact of land use and land cover change on the Densu Delta wetland using Markov chain modeling and artificial neural networks / C. Laar, K. B. K. Annan, A. Gibrilla, Z. Kusi-Afrakoma, O. Korkor-Asante, M. Saah-Hayford, C. Egbi, D. Abdul-Wahab, J. Attah, G. Anornu // *Environmental Challenges*. – 2024. – № 17. – P. 101018. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101018> (дата обращения: 20.02.2025).

71. Leng, X. The Spatiotemporal Change of Glacier Runoff Is Comparably Attributed to Climatic Factors and Physical Properties in Northwestern China / X. Leng, X. Feng, B. Fu, Y. Zhang // *Remote Sensing*. – 2022. – № 14. – P. 2393. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs14102393> (дата обращения: 20.02.2025).

72. Lepikhina, O. Yu. Assessment of the growing stock of forest fund lands taking into account anthropogenic risks: software and methodological support / O. Yu. Lepikhina, V. F. Kovyazin, P. M. Demidova, O. A. Kolesnik, O. S. Gureva, L. A. Basova // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. – 2022. – № 9-333. – P. 185-197. – URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3720> (дата обращения: 20.02.2025).

73. Li, C. Prediction of evaporation temperature in air-water heat source heat pump based on artificial neural network / C. Li, N. Li, X. Tan, A. Yongga, J. Long, X. Shen // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – № 98. – P. 111036. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111036> (дата обращения: 20.02.2025).

74. Li, H. High-resolution mapping of forest structure and carbon stock using multi-source remote sensing data in Japan / H. Li, T. Hiroshima, X. Li, M. Hayashi, T. Kato // *Remote Sensing of Environment*. – 2024. – № 312. – P. 114322. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114322> (дата обращения: 20.02.2025).

75. Li, H. Prediction of Urban Forest Aboveground Carbon Using Machine Learning Based on Landsat 8 and Sentinel-2: A Case Study of Shanghai, China / H. Li, H. Du, L. Xing // *Remote Sensing*. – 2023. – № 1-15. – P. 284. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs15010284> (дата обращения: 20.02.2025).

76. Li, L. Toward a remote sensing method based on commercial LiDAR sensors for the measurement of spray drift and potential drift reduction / L. Li, R. Zhang, L. Chen, A. J. Hewitt, X. He, C. Ding, Q. Tang, B. Liu // *Science of The Total Environment*. – 2024. – № 918. – P. 170819. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170819> (дата обращения: 20.02.2025).

77. Li, M. Y. Variability increased underneath growth enhancement of Mongolian pine natural forests in northeastern China in response to climate change / M. Y. Li, M. Wang, N. Li, J. N. Ge, G. Y. Hao // *Forest Ecology and Management*. – 2025. – № 578. – P. 122414. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122414> (дата обращения: 20.02.2025).

78. Lier, M. Forest relevant targets in EU policy instruments - can progress be measured by the pan-European criteria and indicators for sustainable forest management? / M. Lier, M. Köhl, K. T. Korhonen, S. Linser, K. Prins // *Forest Policy and Economics*. – 2021. – № 128. – P. 102481. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102481> (дата обращения: 20.02.2025).

79. Liu, R. Effects of ground cover management on improving water and soil conservation in tree crop systems: A meta-analysis / R. Liu, B. W. Thomas, X. Shi, X. Zhang, Z. Wang, Y. Zhang // *CATENA*. – 2021. – № 199. – P. 105085. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105085> (дата обращения: 20.02.2025).

80. Lu.belstu.by: Таксационные показатели насаждений: сайт. – Минск, 2015 - . - URL: <https://lu.belstu.by/wp-content/uchebnaya-rabota/dnevnoe/sps/landshaftnaya-taksaciya/lekciya-6-land-lesovodstvo.pdf> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.

81. Luatvietnam.vn: Решение Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама «Об объявлении циркулярных правил по обследованию, инвентаризации и мониторингу лесоразработок» от 16.11.2018 г. № 33/2018/TT-BNNPTNT: сайт. – Ханой, 2017 - . – URL: <https://luatvietnam.vn/nong-nghiep/thong-tu-33-2018-tt-bnnptnt-ve-dieu-tra-kiem-ke-va-theo-doi-dien-bien-rung-169542-d1.html> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

82. Manfusi.com: Карта средней солнечной радиации Социалистической республики Вьетнам: сайт. – Ханой, 2024 - . – URL: <https://manfusi.com/ban-do-buc-ha-mat-troi-tai-viet-nam-nam-2024/> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

83. Mark, L. W. Addressing critical influences on L-band radar backscatter for improved estimates of basal area and change / L. W. Mark, A. L. M. Anthea, A. K. M. Anthony, T. D. Tim, G. H. Geoff // *Remote Sensing of Environment*. – 2022. – № 272. – P. 112933. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112933> (дата обращения: 20.02.2025).

84. Miltiadou, M. A Selection of Experiments for Understanding the Strengths of Time Series SAR Data Analysis for Finding the Drivers Causing Phenological Changes in Paphos Forest, Cyprus / M. Miltiadou, V. Karathanassi, A. Agapiou, C. Theocharidis, P. Kolokousis, C. Danezis // *Remote Sensing*. – 2022. – № 15-14. – P. 3581. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs14153581> (дата обращения: 20.02.2025).

85. Mngadi, M. A systematic review of the application of remote sensing technologies in mapping forest insect pests and diseases at a tree-level / M. Mngadi, I. Germishuizen, O. Mutanga, R. Naicker, W. H. Maes, O. Odebiri, M. Schroder // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2024. – № 36. – P. 101341. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101341> (дата обращения: 20.02.2025).

86. Muhammad, R. Spatiotemporal Change Analysis and Prediction of Future Land Use and Land Cover Changes Using QGIS MOLUSCE Plugin and Remote Sensing Big Data: A Case Study of Linyi, China / R. Muhammad, W. Zhang, Z. Abbas [et al.] // *Land*. – 2022. – № 3-11. – P. 419. – URL: <https://doi.org/10.3390/land11030419> (дата обращения: 20.02.2025).

87. Murugan, P. Deriving Primary Specifications of Optical Remote Sensing Satellite from User Requirements / P. Murugan, N. Pathak // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – № 8-8. – ISSN: 2278-3075 (дата обращения: 20.02.2025).

88. Narayan, K. Forest health assessment for geo-environmental planning and management in hilltop mining areas using Hyperion and Landsat data / K. Narayan, P.

Khanindra, C. Abhisek // *Ecological Indicators*. – 2019. – № 106. – P. 105471. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105471> (дата обращения: 20.02.2025).

89. Natsukawa, H. Importance of the interplay between land cover and topography in modeling habitat selection / H. Natsukawa, H. Yuasa, M. Fujisaki, T. Kobayashi, H. Maruyama, K. Masukawa, K. Nunokawa, H. Saito, G. Sato, L. J. Sutton, M. Takahashi, T. Toba, S. Washizawa, M. Yanagawa, K. Yoshida, F. Sergio // *Ecological Indicators*. – 2024. – № 169. – P. 112896. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112896> (дата обращения: 20.02.2025).

90. Ndong, G. O. Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: Application to the main cropping area in France / G. O. Ndong, J. Villerd, I. Cousin, O. Therond // *Science of The Total Environment*. – 2021. – № 764. – P. 142815. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142815> (дата обращения: 20.02.2025).

91. Ngo, D. T. Assessment of fluctuations in wetland ecosystem areas resulting from anthropogenic activities in the Dong Rui commune, Quang Ninh Province, Vietnam / D. T. Ngo, H. D. Nguyen, H. C. Nguyen // *Heliyon*. – 2023. – № 6-9. – P. e16984. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16984> (дата обращения: 20.02.2025).

92. Nguyen, D. T. Toward high-integrity forest carbon market of ethnic minority groups in Dak Lak province, Vietnam / D. T. Nguyen, T. T. Huong, T. N. L. Duyen, N. T. H. Hanh, N. T. T. Huyen, N. T. Oanh // *Heliyon*. – 2024. – № 22-10. – P. e39998. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39998> (дата обращения: 20.02.2025).

93. Nguyen, T. H. Phan dinh tieu vung khi hau trong so do phan vung khi hau Viet Nam / T. H. Nguyen, D. N. Nguyen // *Tạp chí BDKH*. – 2017. – № 17-2. – URL: <file:///C:/Users/Admin/Desktop/citation/58503%20C4%90i%E1%BB%81u%20v%C4%83n%20b%E1%BA%A3n-163493-1-10-20210615.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).

94. Nong, V. D. Nghiên cứu đa dạng tài nguyên thực vật ở khu vực Tây Nguyên / V. D. Nong, T. T. Vinh, V. K. Cong // *Hội nghị khoa học 45 năm Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*. – 2020. – URL: <https://doi.org/10.15625/vap.2020.00121> (дата обращения: 20.02.2025).

95. Onthidialy.com: Карта рельефа Социалистической Республики Вьетнам: сайт. – Ханой, 2015 - . – URL: <https://onthidialy.com/2015/04/02/bai-28-dac-diem-dia-hinh-viet-nam-dia-ly-8/> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

96. Paillet, Y. One to rule them all? Assessing the performance of sustainable forest management indicators against multitaxonomic data for biodiversity conservation / Y. Paillet, L. Zapponi, P. Schall et al. // *Biological Conservation*. – 2024. – № 300. – P. 110874. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110874> (дата обращения: 20.02.2025).

97. Paudyal, K. Spatial Assessment of Ecosystem Services from Planted Forests in Central Vietnam / K. Paudyal, V. Phuong, Y. Samsudin [et al.] // *Forests*. – 2020. – № 8-11. – P. 822. – URL: <https://doi.org/10.3390/f11080822> (дата обращения: 20.02.2025).

98. Pham, L. H. Ecosystem service value in the context of urbanization: Comparison among economic-social regions of Vietnam / L. H. Pham, N. T. Tuan // *Heliyon*. – 2024. – № 21-10. – P. e39878. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39878> (дата обращения: 20.02.2025).

99. Pham, T. D. Remote Sensing Approaches for Monitoring Mangrove Species, Structure, and Biomass: Opportunities and Challenges / T. D. Pham, N. Yokoya, D. T. Bui, K. Yoshino, D. A. Friess // *Remote Sensing*. – 2019. – № 3-11. – P. 230. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs11030230> (дата обращения: 20.02.2025).

100. Pham, V. T. Classifying forest cover and mapping forest fire susceptibility in Dac Nong province, Vietnam utilizing remote sensing and machine learning / V. T. Pham, T. A. T. Do, H. D. Tran, A. N. T. Do // *Ecological Informatics*. – 2023. – № 79. – P. 102392. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102392> (дата обращения: 20.02.2025).

101. Pix4d.com: LiDAR: what it is, and how it is useful for photogrammetry - Журнал «PIX4D» от 06.01.2021 г.: сайт. – URL: <https://www.pix4d.com/blog/lidar-photogrammetry> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

102. Prasad, P. Evaluation and comparison of the earth observing sensors in land cover/ land use studies using machine learning algorithms / P. Prasad, V. J. Loveson, P. Chandra, M. Kotha // *Ecological Informatics*. – 2022. – № 68. – P. 101522. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101522> (дата обращения: 20.02.2025).

103. Qiao, L. UAV-based chlorophyll content estimation by evaluating vegetation index responses under different crop coverages / L. Qiao, W. Tang, D. Gao, R. Zhao, L. An, M. Li, H. Sun, D. Song // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – № 7-196. – P. 106775. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106775> (дата обращения: 20.02.2025).

104. Rahman, M. S. Climate to Forest Productivity: Implication of Paterson's CVP Index / M. S. Rahman, S. Akter // *Research Journal of Forestry*. – 2015. – № 2-9. – URL: <https://doi.org/10.3923/rjf.2015>. (дата обращения: 20.02.2025).

105. Sanches, I. D. Lem benchmark database for tropical agricultural remote sensing application / I. D. Sanches, R. Q. Feitosa, P. Achanccaray, B. Montibeller, A. J. B. Luiz, M. D. Soares, V. H. R. Prudente, D. C. Vieira, L. E. P. Maurano // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2018. – № 1. – P. 387–392. – URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-387-2018> (дата обращения: 20.02.2025).

106. Schwörer, C. Holocene vegetation, fire and land use dynamics at Lake Svityaz, an agriculturally marginal site in northwestern Ukraine / C. Schwörer, E. L. Gobet et al. // *Vegetation History and Archaeobotany*. – 2022. – № 31. – P. 155–170. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00334-021-00844-z> (дата обращения: 20.02.2025).

107. Shao, J. Large-scale inventory in natural forests with mobile LiDAR point clouds / J. Shao, Y.-C. Lin, C. Wingren [et al.] // *Science of Remote Sensing*. – 2024. – № 10. – P. 100168. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.srs.2024.100168> (дата обращения: 20.02.2025).

108. Sharma, N. Sustainable management and agriculture resource technology system using remote sensing descriptors and IoT / N. Sharma, S. Bhattacharjee, R. D. Garg, K. Sharma, M. Salim // *Geomatica*. – 2024. – № 2-76. – P. 100040. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomat.2024.100040> (дата обращения: 20.02.2025).

109. She, H. Evolution characteristics and mechanism of products from large-particle biomass pyrolysis in molten salt media / H. She, P. Lv, X. Song, Y. Bai, J. Wang, W. Su, J. Wei, W. Bao, G. Yu // *Industrial Crops and Products*. – 2024. – № 4-222. – P. 119963. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119963> (дата обращения: 20.02.2025).

110. Showstack, R. Global Forest Watch Initiative Provides Opportunity for Worldwide Monitoring / R. Showstack // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 2014. – № 95. – URL: <https://doi.org/10.1002/2014EO090002> (дата обращения: 20.02.2025).

111. Shvetsov, E. G. Assessment of Post-Fire Forest Loss in Siberia Using Satellite Data and Its Relationship with Characteristics of Fires / E. G. Shvetsov // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2024. – № 17. – P. 488-496. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1995425524700288> (дата обращения: 20.02.2025).

112. Sinkhonde, D. An artificial neural network approach to predict particle shape characteristics of clay brick powder under various milling conditions / D. Sinkhonde, D. Mashava // *Results in Materials*. – 2024. – P. 100650. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100650> (дата обращения: 20.02.2025).

113. Skydan, O. V. Landscape fire safety management: the experience of Ukraine and the EU / O. V. Skydan, T. P. Fedoniuk, P. V. Pyvovar, V. Ye. Dankevych, Ye. M. Dankevych // *Series of Geology and Technical Sciences*. – 2021. – № 450-6. – P. 125-132. – URL: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.128> (дата обращения: 20.02.2025).

114. Sun, Y. Application of remote sensing technology in water quality monitoring: From traditional approaches to artificial intelligence / Y. Sun, D. Wang, L. Li, R. Ning, S. Yu, N. Gao // *Water Research*. – 2024. – № 267. – P. 122546. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122546> (дата обращения: 20.02.2025).

115. Sztítás, D. The effects of forest bathing on self-criticism, self-compassion, and self-protection: A systematic review / D. Sztítás, J. Halamová, L. Ottingerová, M. Schroevers // *Journal of Environmental Psychology*. – 2024. – № 97. – P. 102372. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2024.102372> (дата обращения: 20.02.2025).

116. Tadese, S. Analysis of the current and future prediction of land use/land cover change using remote sensing and the CA-Markov model in Majang forest biosphere reserves of Gambella, Southwestern Ethiopia / S. Tadese, T. Soromessa, T. Bekele // *The Scientific World Journal*. – 2021. – Article ID 6685045. – 18 p. – URL: <https://doi.org/10.1155/2021/6685045> (дата обращения: 20.02.2025).

117. Tan, Y.C. Comparative Study of Random Forest and Support Vector Machine for Land Cover Classification and Post-Wildfire Change Detection / Y.C. Tan, L. Duarte, A. C. Teodoro // *Land*. – 2024. – № 11-13. – P. 1878. – URL: <https://doi.org/10.3390/land13111878> (дата обращения: 20.02.2025).

118. Thuvienphapluat.vn: Решение Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама «Об объявлении состояния лесов по всей стране 2021 года» от 27.07.2022 г. № 2860/QĐ-BNN-TCLN: сайт. – Ханой, 2022 - . – URL: <https://thuvienphapluat.vn/phap-luat/thoi-su-phap-luat/cong-bo-hien-trang-rung-toan-quoc-nam-2021-o-viet-nam-hien-trang-rung-toan-quoc-nam-2021-co-gi-thay-34592.html> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

119. Thuvienphapluat.vn: Решение Национального Собрания Социалистической Республики Вьетнам «Об объявлении Закона о лесном хозяйстве» от 15.11.2017 г. № 16/2017/QH14: сайт. – Ханой, 2017 - . – URL: [https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Linh-vuc-khac/Luat-lam-nghiep-367277.aspx?anchor=dieu\\_5](https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Linh-vuc-khac/Luat-lam-nghiep-367277.aspx?anchor=dieu_5) (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

120. Trisasongko, B. H. A review of remote sensing applications in tropical forestry with a particular emphasis in the plantation sector / B. H. Trisasongko, D. Paull // *Geocarto International*. – 2018. – № 3-35. – P. 1-40. – URL: <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1516245> (дата обращения: 20.02.2025).

121. Valjarević, A. GIS and remote sensing methods in predicting the dissipation time of rural settlements under the influence of climate change in the Republic of Serbia / A. Valjarević // *Journal of Urban Management*. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.12.002> (дата обращения: 20.02.2025).

122. Verma, S. Characterizing aerosols during forest fires over Uttarakhand region in India using multi-satellite remote sensing data / S. Verma, M. Soni, H. Kumar, S. Payra, M. K. Mishra, R. Bhawar // *Advances in Space Research*. – 2022. – № 70. – P. 947-960. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.051> (дата обращения: 20.02.2025).

123. Wang, B. Vegetation differentiation characteristics and control mechanisms in the Altay region based on topographic gradients / B. Wang, W. Cheng, H. Xu, R. Wang, K. Song, A. Bao, Q. Shi // *Ecological Indicators*. – 2024. – № 160. – P. 111838. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111838> (дата обращения: 20.02.2025).

124. Wang, S. Multispectral Remote Sensing Data Are Effective and Robust in Mapping Regional Forest Soil Organic Carbon Stocks in a Northeast Forest Region in China / S. Wang, J. Gao, Q. Zhuang, Y. Lu, H. Gu, X. Jin // *Remote Sensing*. – 2020. – № 3-12. – P. 393. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12030393> (дата обращения: 20.02.2025).

125. Wang, Y. Analyzing the role of environmental policy innovations and natural resource management in driving circular economy forward: Evidence from BRICS economies / Y. Wang, J. Zhen, B. Wang // *Journal of Environmental Management*. – 2024. – № 371. – P. 123252. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123252> (дата обращения: 20.02.2025).

126. Wpuonline.com: Карта рельефа Социалистической Республики Вьетнам: сайт. – Ханой, 2020 - . – URL: <https://wpuonline.com/download-ban-do-dia-hinh-vietnam/> (дата обращения: 20.02.2025). – Режим доступа: открытый. – Текст: электронный.

127. Wu, X. Spatial sampling design optimization of monitoring network for terrestrial ecosystem in China / X. Wu, H. He, L. Zhang, L. Feng, X. Ren, W. Liu, C. Zou, N. Lin // *Science of the Total Environment*. – 2022. – № 847. – P. 157397. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157397> (дата обращения: 20.02.2025).

128. Wu, Z. Study on Robust Loss Function for Artificial Neural Networks Models in Reliability Analysis / Z. Wu, J. He, X. Sun // *Procedia Structural Integrity*. –

2024. – № 52. – P. 203-213. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.12.021> (дата обращения: 20.02.2025).

129. Xie, Z. Classification of Land Cover, Forest, and Tree Species Classes with ZiYuan-3 Multispectral and Stereo Data / Z. Xie, D. Lu, E. Chen // *Remote Sensing*. – 2019. – № 2-11. – P. 164. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs11020164> (дата обращения: 20.02.2025).

130. Xu, Z. How Potential Evapotranspiration Regulates the Response of Canopy Transpiration to Soil Moisture and Leaf Area Index of the Boreal Larch Forest in China / Z. Xu, X. Man, T. Cai, Y. Shang // *Forests*. – 2022. – № 4-13. – P. 571. – URL: <https://doi.org/10.3390/f13040571> (дата обращения: 20.02.2025).

131. Yang, B. The Optimal Phenological Phase of Maize for Yield Prediction with High Frequency UAV Remote Sensing / B. Yang, W. Zhu, E. E. Rezaei, J. Li, Z. Sun, J. Zhang // *Remote Sensing*. – 2022. – № 7-14. – P. 1559. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs14071559> (дата обращения: 20.02.2025).

132. Yermolayev, O. Spatial-Temporal Dynamics of the Ephemeral Gully Belt on the Plowed Slopes of River Basins in Natural and Anthropogenic Landscapes of the East of the Russian Plain / O. Yermolayev, E. Platoncheva, B. Essuman // *Geosciences*. – 2020. – № 5-10. – P. 167. – URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences10050167> (дата обращения: 20.02.2025).

133. Yulianto, F. Analysis of the dynamics of land use change and its prediction based on the integration of remotely sensed data and CA-Markov model, in the upstream Citarum Watershed, West Java, Indonesia / F. Yulianto, T. Maulana, M. R. Khomarudin // *International Journal of Digital Earth*. – 2018. – № 12. – P. 1151–1176. – URL: <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1497098> (дата обращения: 20.02.2025).

134. Zahid, A. Machine learning enabled identification and real-time prediction of living plants' stress using terahertz waves / A. Zahid, K. Dashtipour, H. T. Abbas, I. Ben Mabrouk, M. Al-Hasan, A. Ren, M. A. Imran, A. Alomainy, Q. H. Abbasi // *Defence Technology*. – 2022. – № 18. – P. 1330–1339. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.01.003> (дата обращения: 20.02.2025).

135. Zhang, F. Estimation of Aboveground Carbon Density of Forests Using Deep Learning and Multisource Remote Sensing / F. Zhang, X. Tian, H. Zhang, M. Jiang // *Remote Sensing*. – 2022. – № 13-14. – P. 3022. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs14133022> (дата обращения: 20.02.2025).

136. Zhang, X. Influences of fractional vegetation cover on the spatial variability of canopy SIF from unmanned aerial vehicle observations / X. Zhang, Z. Zhang, Y. Zhang, Q. Zhang, X. Liu, J. Chen, Y. Wu, L. Wu // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2022. – № 107. – P. 102712. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102712> (дата обращения: 20.02.2025).

137. Zhang, X. Life-Cycle Economics and GHG Emissions of Forest Biomass Harvesting and Utilization for Alternative Value-Added Bioproducts: An Integrated Modeling Framework / X. Zhang, J. Wang, J. Li, J. Vance // *Forests*. – 2025. – № 6-16. – P. 871. – URL: <https://doi.org/10.3390/f16060871> (дата обращения: 20.02.2025).

138. Zhou, L. Land surface phenology detections from multi-source remote sensing indices capturing canopy photosynthesis phenology across major land cover types in the Northern Hemisphere / L. Zhou, W. Zhou, J. Chen, X. Xu, Y. Wang, J. Zhuang, Y. Chi // *Ecological Indicators*. – 2022. – № 11-135. – P. 108579. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108579> (дата обращения: 20.02.2025).

139. Zhou, L. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model / L. Zhou, X. Dang, Q. Sun, S. Wang // *Sustainable Cities and Society*. – 2020. – № 55. – P. 102045. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102045> (дата обращения: 20.02.2025).

140. Zhu, Y. Driving forces and prediction of urban open spaces morphology: The case of Shanghai, China using geodetector and CA-Markov model / Y. Zhu, G. H. T. Ling // *Ecological Informatics*. – 2024. – № 82. – P. 102763. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102763> (дата обращения: 20.02.2025).

141. Zhu, Y. Estimation of Forest Biomass in Beijing (China) Using Multisource Remote Sensing and Forest Inventory Data / Y. Zhu, Z. Feng, J. Lu, J. Liu // *Forests*. – 2020. – № 11. – P. 163. – URL: <https://doi.org/10.3390/f11020163> (дата обращения: 20.02.2025).

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****Акт внедрения****Утверждаю:**

Директор Общества с ограниченной ответственностью по инвестициям, производству и услугам "NGUON VIET",  
Вьетнам

  
**Нгуен Ань Туен**  
Дата « 19 » 08 2024 г.

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертации  
**Нгуен Чьонг Ан**  
по научной специальности 1.6.15. Землеустройство, кадастр  
и мониторинг земель

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:

**Председатель:** Нгуен Тхи Чанг;

**Члены комиссии:** Ле Тхань Шон, Нгуен Тхи Тхань Тхуи.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Мониторинг земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам для природно-хозяйственного использования», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, применяются в деятельности ООО по инвестициям, производству и услугам "NGUON VIET" для эффективного управления лесными ресурсами Социалистической республики Вьетнам.

**Внедрение и применение указанных результатов позволяет:**

- автоматически и непрерывно получать данные со снимков о землях лесного фонда страны, что увеличивает производительность труда при инвентаризации лесов на 40% по сравнению с традиционными наземными методами;

- выявить динамику земель лесного фонда по категориям, площадям, породному составу, состоянию и таксационным показателям древостоев, что обеспечивает рациональное управление лесными ресурсами, предотвращает нарушения лесного законодательства, сохраняет и улучшает окружающую среду;

- принимать обоснованные решения для проведения экологически значимых мероприятий по охране, защите и восстановлению растительных сообществ и их биологического разнообразия;

- использовать методы оценки показателей лесного фонда, а также модели машинного обучения и ГИС-технологии для прогнозирования состояния и качества лесных ресурсов на среднесрочную перспективу (10 лет), включая увеличение среднегодового запаса древесины до 5% и оценку экологической роли земель лесного фонда Социалистической республики Вьетнам.

**Председатель комиссии**

Начальник отдела технологических разработок

Нгуен Тхи Чанг



**Члены комиссии:**

Главный инженер

Ле Тхань Шон

Начальник отдела безопасности

Нгуен Тхи Тхань Тхуи

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2024667639**

**Программа для ЭВМ по вычислению прямой и  
рассеянной солнечной радиации по входным данным  
широты местности и времени наблюдений**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Ковязин Василий Фёдорович (RU), Нгуен Чьонг Ан  
(VN), Зубов Андрей Владимирович (RU)*

Заявка № **2024666225**  
Дата поступления **15 июля 2024 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **26 июля 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*  
  
**Ю.С. Зубов**

