

**Николаев Антон Александрович**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ  
ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В КОНЦЕ XX - НАЧАЛЕ XXI ВЕКА  
НА ТЕРРИТОРИИ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К  
ПЕРВОУРАЛЬСКО-РЕВДИНСКОМУ ПРОМЫШЛЕННОМУ УЗЛУ**

4.1.6 – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры,  
агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО  
«Уральский государственный лесотехнический университет»

- Научный руководитель: доктор биологических наук, доцент  
Фомин Валерий Владимирович
- Официальные оппоненты: Уразгильдин Руслан Вилисович, доктор биологических наук, доцент, Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», лаборатория лесоведения, ведущий научный сотрудник.
- Мохначев Павел Евгеньевич, кандидат биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», лаборатория экологии техногенных растительных сообществ, заведующий лабораторией.
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 27.02.2025 в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.424.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» ([www.usfeu.ru](http://www.usfeu.ru)).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202 \_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. с.-х. наук, доцент

Магасумова  
Альфия Гаптрауфовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Леса промышленно развитых регионов испытывают негативные воздействия, выражающиеся в увеличении антропогенной нагрузки в виде хозяйственного использования (заготовка древесины), влияния промышленного и бытового загрязнения, а также рекреации. Они могут приводить к ухудшению состояния и деградации ранее сформировавшихся древостоев, а также влияют по возрастную и восстановительную динамику лесных насаждений. Оценка степени воздействия промышленных загрязнений на их состояние является важной задачей при планировании лесопользования и мероприятий, направленных на формирование устойчивых к влиянию антропогенных факторов лесов, включая действие аэропромышленных загрязнений.

Степень негативного воздействия антропогенных факторов на лесные экосистемы можно оценивать по комплексу таксационных и биофизических параметров древостоев. Данные дистанционного зондирования позволяют проводить оценку состояния лесных насаждений на обширных по площади территориях и снизить затраты ресурсов и времени на обследования по сравнению с затратами на проведение наземных обследований. При этом необходимо отметить, что применение данных космической съемки шаблонно для разных районов невозможно из-за региональных природно-климатических особенностей и разных условий местопроизрастания, оказывающих влияние на спектральные характеристики древостоев (Дюкарев и др., 2005; Барталев и др., 2007; Kajisa et al., 2009 и др.), а также влияния на них антропогенных факторов (Андреева и др., 2007; Низаметдинов, 2009).

Динамический характер антропогенных факторов требует разработки новых методов количественной оценки состояния лесных насаждений, позволяющих учитывать закономерности изменения их состояния в пространстве и времени.

Степень разработанности темы исследований. Научные исследования, посвященные определению состояния лесных насаждений, их динамике, мониторингу по их спектральной отражательной способности, на протяжении многих десятилетий ведутся как отечественными, так и зарубежными учеными (Жиринов, 1997; Кравцова и др., 2002; Черенькова, Козлов, 2009; Черепанов, Дружинина, 2009; Варламова, Соловьев, 2010; Медведева и др., 2010; Барталев и др., 2015; Бондур, Воробьев, 2015; Плотникова и др., 2019; Стыценко и др., 2019; Гаврилова и др., 2020; Комаров и др., 2021; Lambin, 1999; Ji, Jansen, 1999; Hall et al., 2003; Lu et al., 2004; Eklundh et al., 2005; King et al., 2005; Virk, King 2006; Chen, Zhao, 2007; Jupiter, Marion, 2008; Hermosilla et al., 2016; Van der Plas et al., 2018; Zhao et al., 2018; Ottosen et al., 2020; Garioud et al., 2021 и др.).

Несмотря на значительный объем проведенных работ по изучению состояния лесных насаждений по их спектральным характеристикам, тем не менее до сих пор отклик спектральной отражательной способности насаждений от их морфометрических характеристик в районах действия аэропромышленных загрязнений, включая исследования пространственно-временной динамики состояния лесных насаждений на относительно больших интервалах времени, остается не до конца изученным. Исследования в данной области позволят внести вклад в понимание реакции лесных насаждений на действие комплекса антропогенных факторов и оценку степени адаптации или восстановления лесных экосистем на сокращение аэропромышленных загрязнений.

Диссертация является законченным научным исследованием.

Цель и задачи исследований. Цель работы – исследование пространственно-временной динамики состояния лесных насаждений на территории, прилегающей к Первоуральско-Ревдинскому промышленному узлу в конце XX – начале XXI века с использованием данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и материалов государственной инвентаризации лесов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ состояния лесных насаждений на основе данных комплексной оценки состояния сосновых древостоев по их морфометрическим характеристикам и антропогенных ландшафтов с использованием открытых картографических данных.

2. Провести снегомерные измерения в районе исследований и оценить степень загрязнения снеговой воды в условиях после сокращения выбросов Среднеуральского медеплавильного завода с использованием методов оценки фитотоксичности и кислотности.

3. Провести анализ взаимосвязи спектральных характеристик космических снимков и результатов количественной комплексной оценки состояния сосновых древостоев на основе данных наземных измерений морфометрических характеристик деревьев на пробных площадях.

4. Провести анализ пространственно-временной динамики состояния лесных насаждений района исследований с преобладанием в их составе пяти основных лесообразующих древесных пород с 1990 по 2020 годы с использованием данных космической съемки разных лет и материалов лесоустройства.

Научная новизна. Впервые для территории, прилегающей к Первоуральско-Ревдинскому промышленному узлу, исследованы пространственные закономерности распределения снежного покрова, уровней кислотности и фитотоксичности снеговой воды, а также пространственно-временная динамика состояния древостоев лесных насаждений за 30-летний период в зонах с разными уровнями аэропромышленного загрязнения с использованием данных дистанционного зондирования, в том числе в условиях сокращения выбросов в атмосферу поллютантов медеплавильного производства.

Практическая ценность работы. Полученные в ходе проведенных исследований результаты позволили углубить представления о демутиационном потенциале лесных насаждений, длительное время находившихся под воздействием аэропромвыбросов медеплавильного производства, при возникновении условий снижения уровня выбросов, обусловленных внедрением новой технологии производства продукции медеплавильного завода.

Разработанная методика оценки пространственно-временной динамики лесных насаждений с использованием индекса влажности EWDI, рассчитываемого на основе данных спутниковой съемки Landsat TM, может быть использована при создании систем экологического мониторинга лесов, находящихся в условиях загрязнения атмосферы выбросами промышленных предприятий цветной металлургии. Разработанные картосхемы могут быть использованы для организации лесохозяйственной деятельности в части проведения мероприятий, направленных на улучшение санитарного состояния лесных насаждений.

Методология и методы исследования. Исследования проведены при использовании апробированных общепринятых методик оценки лесоводственно-таксационных характеристик лесных насаждений, анализе современных цифровых данных космической съемки и материалов лесоустройства. Оценка состояния лесных насаждений района исследований проведена на основе анализа кислотности и фитотоксичности снеговой воды. Оценку фитотоксичности проводили методом биотестирования с использованием тест-культуры водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer. В работе были использованы методы математико-статистической обработки данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованный индекс влажности EWDI позволяет адекватно оценить состояние древостоев, находящихся в условиях воздействия загрязнения атмосферы промышленными выбросами медеплавильного производства.

2. Уровни кислотности и фитотоксичности снеговой воды после снижения выбросов медеплавильного производства в атмосферу свидетельствуют о том, что значения

показателей в импактной зоне вокруг Среднеуральского медеплавильного завода соответствуют значениям кислотности и фитотоксичности в фоновой зоне.

3. Картограмма антропогенных ландшафтов и состояния лесных насаждений, созданная с использованием картографических данных и результатов комплексной оценки состояния древостоев на пробных площадях, позволяет оценить характер и уровень воздействия комплекса антропогенных факторов на экосистемы на разных участках исследуемой территории.

4. Установлена тенденция улучшения состояния лесных насаждений, расположенных на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода, за период с 1990 по 2020 годы. Картограммы состояния лесных насаждений, созданные на основе усовершенствованного индекса влажности EWDI, позволяют оценить пространственные закономерности изменения их состояния за исследуемый период.

Степень достоверности результатов исследования. Материалы и экспериментальные данные, используемые при подготовке диссертационного исследования, характеризуются достаточным объемом, обработаны с использованием общенаучных методов анализа и оценки достоверности данных.

Апробация результатов работы. Основные положения работы были представлены на IV Международной научно-практической конференции «Экологическое равновесие: Антропогенные изменения географической оболочки Земли, охрана природы» (Санкт-Петербург, 2013); XXIII Международной научно-практической конференции «Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии» (Пенза, 2021); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и мониторинг природных экосистем» (Пенза, 2021; 2022); Всероссийской научно-практической конференции для молодых ученых и студентов «Инициативы молодых – науке и производству» (Пенза, 2021; 2022); XX Международной научно-практической конференции «Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России» (Пенза, 2022); V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы природопользования и природообустройства» (Пенза, 2022); XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2024).

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследования, разработке программы и обосновании методики проведения работ, выполнении снегомерных измерений и сборе образцов снега, создании картограммы антропогенных ландшафтов и состояния древостоев района исследований. Также автором проведена обработка и дешифрование цифровых космических снимков, проведен анализ закономерностей изменения состояния лесных насаждений в районе исследований за период с 1990 по 2020 годы. Автором выполнены статистическая обработка полученных данных, анализ и обобщение полученных результатов.

Публикации по теме научного исследования. Основные положения исследований по теме диссертации отражены в 14 печатных работах. В рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК, – 4 статьи, 10 печатных работ опубликовано в сборниках материалов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 176 источников, в том числе 63 на иностранном языке. Текст диссертации содержит 12 таблиц, которые представляют различные данные и результаты исследования, а также 28 рисунков, иллюстрирующих основные теоретические концепции и результаты. Диссертация включает 35 приложений, в которых представлены дополнительные материалы, используемые в исследовании. Общий объем диссертации составляет 186 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Состояние проблемы дешифрирования космических снимков для целей лесоустройства и оценки состояния лесных насаждений**

Применение аэрокосмической информации для инвентаризации лесов с учетом их многофункциональной ценности как никогда актуально, но нуждается в дальнейшем развитии методов. Методы картографического моделирования на основе ГИС-технологий помогают интегрировать различные пространственные данные, включая результаты дистанционного зондирования и наземных исследований. Проведенные исследования в данной области доказывают возможность анализа лесных насаждений как по биофизическим (определение состояния древостоев), так и таксационным характеристикам древостоев используя данные дистанционного зондирования при условии применения спектральных диапазонов и индексов наиболее информативных (чувствительных) к изменению показателей лесных насаждений.

### **Глава 2. Объекты и методика исследований**

Объект исследования – лесные насаждения, находящиеся на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (г. Ревда, Свердловская область, Россия). Восточная граница района исследований расположена вблизи западной окраины г. Екатеринбурга. В соответствии с лесорастительным районированием Б. П. Колесникова на территории данного района проходит граница двух лесорастительных областей. Восточная часть этой территории относится к южно-таежному округу Зауральской предгорной провинции Уральской горной лесорастительной области. А западная часть связана с южно-таежным округом Среднеуральской предгорной провинции Западно-сибирской равнинной лесорастительной области (Лесорастительные условия..., 1973).

Поверхность района исследований состоит из чередующихся возвышенностей и понижений, ориентированных меридионально. В понижениях расположены озера, часто граничащие с торфяниками. Речная сеть – разветвленная система рек, сформированная рекой Чусовой и ее многочисленными притоками (Архипова, 1958; Лесорастительные условия..., 1973; Атлас Свердловской области..., 1997).

Климат в районе исследований умеренно влажный, умеренно холодный, континентальный. Среднегодовая температура составляет около +1 °С. Среднемесячная температура самого холодного месяца – января – находится в пределах от минус 16 до минус 17 °С, самого теплого – июля – +17 °С. В течение сезона с мая по сентябрь сумма положительных температур в данном месте достигает 2000 °С. Безморозный период продолжается от 90 до 115 дней, что предоставляет благоприятные условия для развития лесной растительности (Каминский, 1925; Лесорастительные условия..., 1973). Годовая сумма осадков находится в диапазоне между 400 и 600 мм, а значение гидротермического коэффициента составляет от 1,2 до 1,4, указывая на избыточный уровень увлажнения. Во время зимы мощность снежного покрова может достигать от 40 до 50 см. Среднегодовая относительная влажность составляет примерно 72 %. Средняя годовая скорость – 2,8 м/с (Прокаев, 1976).

Первое промышленное производство в этих местах началось в 30-х годах XVIII века. В этот период были основаны Билимбаевский и Ревдинский железоделательные заводы (Генин, 1937; Капустин, Корнеев, 1996). В конце XIX – начале XX века на исследуемой территории одновременно начали действовать несколько крупных предприятий металлургического и химического комплексов.

Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ), расположенный между городами Ревдой и Первоуральском, является основным источником загрязнения атмосферы промышленными выбросами на исследуемой территории. Это предприятие – одно из самых крупных в сфере медеплавильной промышленности Свердловской области, производит черную медь, ксантогенат, серную кислоту и двойной суперфосфат (Капустин, Корнеев, 1996). Все эти продукты имеют важное значение в различных отраслях, однако их произ-

водство сопровождается высоким уровнем загрязнения окружающей среды.

В соответствии с целью программа исследований включала в себя следующие виды работ:

1. Провести анализ литературных данных о состоянии проблемы дешифрирования космических снимков для целей лесоустройства и оценки состояния древостоев в зоне влияния агропромышленных загрязнений медеплавильного производства.

2. Собрать и изучить данные о природных условиях, лесном фонде, почвах и других особенностях района исследований.

3. Провести измерение высоты снежного покрова и сбор проб снега для определения фитотоксичности и кислотности снеговой воды.

4. На основе ранее полученных данных коллективом исследователей из УГЛТУ во второй половине 1990-х – начале 2000-х годов и картографических данных OSM ([openstreetmap.org](http://openstreetmap.org)) создать картосхему антропогенных ландшафтов и состояния древостоев.

5. Провести поиск и подбор космических снимков, полученных при помощи сенсора Landsat, которые соответствуют требованиям по пространственному разрешению и периодичности для оценки состояния лесных насаждений района исследований.

6. Провести дешифрирование космических снимков второй половины 1990-х годов и данных наземных измерений на пробных площадях, проведенных коллективом исследователей УГЛТУ в этот период.

7. Оценить экологическое состояние лесных насаждений по взаимосвязи полученных данных спектральных индексов со значениями обобщенного показателя состояния древостоев (ОПС).

8. На основе полученных данных спектральных индексов провести пространственный анализ динамики состояния лесных насаждений в районе исследований за период с середины 1990-х годов до настоящего времени.

Подбор участков для сбора данных о высоте снежного покрова и кернов снега проводился с учетом мест измерений и сбора образцов на удалении от дорог свыше 100 м, с учетом естественных просветов в чистых хвойных насаждениях, под пологом лиственных деревьев в смешанных и лиственных древостоях (Водорегулирующая роль..., 1990; Луганский, 1996).

Снегомерная съемка проводилась согласно наставлениям (Наставление гидрометеорологическим станциям..., 1985). При проведении снегомерных наблюдений было заложено 66 снегомерных площадок (СП) в период с 14 марта по 4 апреля 2010 г. Для проведения точных и надежных снегомерных наблюдений использовалась специальная аппаратура, состоящая из двух основных приборов: рейки снегомерной и снегомера весового типа ВС-43.

На каждой снегомерной площадке были определены координаты ее центра с помощью GPS-приемника. На основе географических координат центров площадок был построен векторный точечный слой, содержащий данные о глубине снега, фитотоксичности и кислотности снеговой воды. Пространственный анализ данных был выполнен с использованием геоинформационной системы QGIS ([qgis.org](http://qgis.org)).

Определение степени токсичности снеговой воды проводили с использованием двух методик биотестирования. В первом случае в качестве показателя токсичности использовали степень изменения суточного прироста числа клеток в тест-культуре одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer (Григорьев, 2004).

В основе второй методики лежит способ определения токсичности воды и почв, разработанный проф. С. А. Шавниным с соавторами (2009). Реакцию хлореллы на воздействие загрязнителей оценивали по амплитуде индуцированных максимумов задержанной флуоресценции (ЗФ) на миллисекундных интервалах затухания, стимулированных сначала светом высокой, а затем низкой интенсивности, с помощью

прибора «Фотон-7», разработанного в Красноярском государственном университете (Григорьев и др., 1996).

Мезоклимат района исследования анализировался с использованием данных инструментальных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных в меридиональном градиенте. В работе были использованы данные метеонаблюдений из архива сайта [gr5.ru](http://gr5.ru). Для оценки изменения количества осадков в холодный период года на метеостанциях при продвижении с запада на восток были построены графики зависимости данного показателя от долготы. Пространственный анализ данных был выполнен с использованием геоинформационной системы QGIS ([qgis.org](http://qgis.org)) и данных цифровой модели рельефа Свердловской области (NASA).

Для создания картосхемы антропогенных ландшафтов и состояния лесов района исследований была использована классификация антропогенных ландшафтов по их содержанию (Мильков, 1973; Егоров, Козин, 2006) и данные проведенной ранее коллективом исследователей из УГЛТУ комплексной оценки состояния древостоев (Фомин, Шавнин, 2001; Фомин, 2009).

В качестве источника данных о ландшафтах исследуемой территории были использованы картографические материалы Open Street Map ([openstreetmap.org](http://openstreetmap.org)) и данные экологического зонирования исследуемой территории (Фомин, 2009).

Картосхема антропогенных ландшафтов и состояния лесов района исследований была создана в результате наложения в географической информационной системе QGIS слоев, представляющих антропогенные комплексы по Ф. Н. Милькову (сельскохозяйственные, лесные, водные, промышленные, селитебные, дорожные, рекреационные, беллигеративные), на растровый слой, характеризующий состояние лесов на основе комплексной оценки состояния древостоев.

В ходе выполнения исследований были проведены работы по поиску наиболее информативного спектрального индекса и коэффициента, характеризующего состояние древостоев в районе исследований, находящихся в условиях антропогенных воздействий разной природы и силы (различные виды лесопользования, влияние промышленных предприятий в виде промышленных выбросов в атмосферу, сточные воды, влияние автотранспорта, рекреационная нагрузка).

Одним из наиболее информативных индексов является усовершенствованный индекс влажности EWDI (enhanced wetness difference index), который рассчитывается как разность полученных значений индекса влажности КТ<sub>3</sub> (компонента преобразования изображения).

Оценка состояния лесных насаждений в районе исследований была проведена ранее на основе комплекса морфометрических параметров деревьев и физиологических характеристик хвои (Фомин, Шавнин, 2001; Фомин, 2008, 2009, 2011). Данные, полученные в результате этих исследований на 15 пробных площадях, были использованы для оценки взаимосвязи параметров состояния древостоев с данными спектральной отражательной способности лесных насаждений и рассчитанного усовершенствованного индекса влажности (EWDI).

Методика оценки состояния лесных насаждений состояла из следующих этапов.

1. Создание векторной электронной карты лесных насаждений.
2. Вычисление спектрального индекса влажности по спутниковым данным на 1988, 1990, 1996, 2002, 2010, 2015, 2018, 2020 года.
3. Расчет усовершенствованного индекса влажности EWDI лесных насаждений на 1990, 1996, 2002, 2010, 2015, 2018, 2020 года.
4. Получение среднестатистических значений индекса EWDI для каждого лесного выдела электронной лесной карты.
5. Выявление зависимости значений индекса EWDI от данных экологического зонирования состояния сосновых насаждений на 15 пробных площадях.



6. Установление шкалы состояния лесных насаждений по данным индекса EWDI.

Временной диапазон использованных в работе данных дистанционного зондирования составляет 32 года. В работе использованы архивные снимки спутников серии Landsat, предоставленные геологической службой США (USGS <https://earthexplorer.usgs.gov>). Все использованные в работе космические снимки были подвергнуты процедуре атмосферной и радиометрической коррекции (Chander et al., 2009).

При проведении исследований заложено 66 площадок для сбора данных о высоте снежного покрова, фитотоксичности и кислотности снеговой воды, на которых произведен отбор образцов снега для лабораторного анализа – 198 шт., определение фитотоксичности снеговой воды – 132 шт., определение кислотности снеговой воды – 66 шт., создана векторная электронная карта лесных насаждений, получены среднестатистические значений индекса EWDI для 32049 лесных выделов электронной лесной карты.

### **Глава 3. Состояние лесных насаждений на территории, прилегающей к Первоуральско-Ревдинскому узлу в 1990-х – начале 2000-х годов**

Экосистемы, расположенные на промышленно развитых территориях с большим количеством промышленных объектов, сталкиваются с серьезным воздействием как со стороны повышенного загрязнения атмосферы, вызванного выбросами промышленных предприятий, так и в результате высокого уровня рекреационной активности населения. Поступление поллютантов в окружающую среду в процессе работы промышленных предприятий негативно сказывается на состоянии лесных экосистем (Фомин, 2009). В то же время следует отметить, что лесная биологическая экосистема под воздействием негативных факторов сохраняет способность к средообразованию, климаторегулированию и гидрологическим функциям и используется в различных видах лесопользования (Воробейчик и др., 1994; Николаев, Николаева, 2021).

В рамках генетического подхода к классификации типов леса лесные насаждения рассматриваются с точки зрения учета их возрастной и восстановительной динамики (Колесников и др., 1974; Fomin et al., 2017, 2021; Fomin, Mikhailovich, 2021; Ivanova et al., 2022). Состояние лесных насаждений также изменяется по времени. Это может быть связано как с изменением уровней действия экологических факторов, так и изменением чувствительности компонентов лесного насаждения к их действию.

Биоиндикаторные методы широко используются для определения состояния лесных экосистем (Киселев и др., 1986; Крючков, Сыроид, 1990; Крючков, 1991; Воробейчик и др., 1994; Алексеев, Жеребцов, 1995; Воробейчик, 2003; Shavnin et al., 1997).

В рамках международного проекта INTAS 93-1645 сотрудники Уральского государственного лесотехнического университета и Института экологии растений и животных УрО РАН провели сбор, обработку и анализ данных о состоянии сосновых лесов в 119 ПП, на 133 пробных площадках для оценки состояния лишайниковых синузид и 54 точках измерения снежного покрова на разном расстоянии от Среднеуральского медеплавильного завода, являющегося основным источником загрязнения атмосферы (Шейдеггер и др., 1998; Фомин и др., 2001; Папулов, 2003; Фомин, 2008, 2009; Фомин, Николаев, 2011; Попов и др., 2011; Shavnin et al., 1997).

Зонирование района исследований по состоянию древостоев выполнено с помощью метода пространственной интерполяции «кригинг». Изменения балла состояния сосновых молодняков по комплексу морфометрических характеристик на 119 пробных площадях (Фомин, 2009) и содержание меди в почве 15 постоянных пробных площадей (Папулов, 2003).

Полученная картосхема, характеризует изменение состояния древостоев, оцененное на основе выборочных данных. При этом необходимо отметить, что данный район, кроме лесного, представлен и другими типами ландшафтов. Ф. Н. Мильков предложил классификацию антропогенных ландшафтов (Мильков, 1973; Егоров, Козин, 2006), которая

была использована в данном исследовании для создания картосхемы антропогенных ландшафтов и состояния лесных экосистем района исследований. В ней выделяют следующие антропогенные комплексы: сельскохозяйственные, лесные, водные (водохранилища и пруды), промышленные, селитебные, дорожные, рекреационные и бelligеративные (связанные с военной деятельностью).

На рисунке 1 представлена картосхема антропогенных ландшафтов и состояния древостоев, созданная на основе данных оценки состояния сосновых молодняков по комплексу морфометрических характеристик и результата классификации картографических данных OSM (openstreetmap.org) с использованием классификации антропогенных комплексов (по Ф. Н. Милькову).

Картосхема, представленная рисунке 1, является одним из результатов исследований, который позволил свести воедино ранее полученные данные о состоянии лесных насаждений, находящихся на исследованной территории под действием комплекса естественных и антропогенных факторов. Последние включают как прямые воздействия, приводящие к формированию сельскохозяйственных, селитебных, индустриальных, дорожных и бelligеративных ландшафтов, так и воздействия, обусловленные изменением компонентов окружающей среды, например, загрязнением атмосферы промышленными выбросами предприятий Первоуральско-Ревдинского промышленного узла.

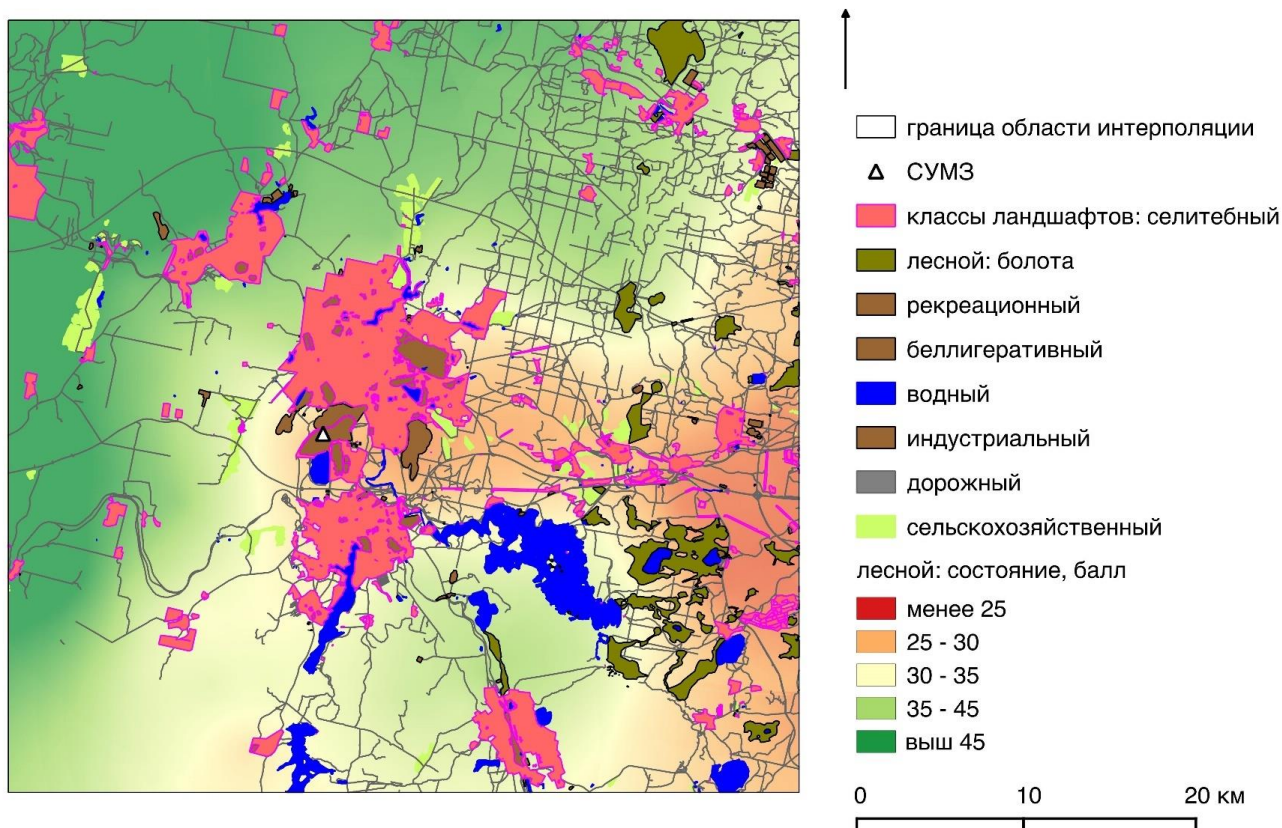


Рисунок 1 – Картосхема антропогенных ландшафтов района и состояния лесных насаждений на основе данных комплексной оценки состояния сосновых молодняков искусственного происхождения по морфометрическим характеристикам деревьев (диаметр, высота, прирост по диаметру и высоте за 5 лет)

Для оценки состояния лесных насаждений могут использоваться различные индексы, рассчитываемые на основе данных космических снимков, включая усовершенствованный индекс влажности EWDI. Для оценки возможного влияния на его значения неравномерности

выпадения осадков был проведен анализ количества выпавших осадков в разных частях района на основе данных метеонаблюдений на метеорологических станциях.

Анализ данных свидетельствует о сокращении количества осадков. Эта закономерность обусловлена преобладающим движением воздушных масс с запада на восток, по ходу движения которых встречается преграда в виде Уральского хребта. При этом интерес представляет тенденция на относительно небольшом участке трансекты – между западной и восточной границей района исследований.

Вблизи этих границ находятся станции Дружинино и Екатеринбург соответственно. На данном участке тоже прослеживается тенденция сокращения осадков в зимний период.

В начале апреля 2010 г. были проведены снегомерные наблюдения. На рисунке 2 представлена картосхема, характеризующая высоту снежного покрова в разных точках района исследований, на рисунке 3 отображены поверхности, характеризующие изменение высоты снежного покрова, запаса снега, запаса снеговой воды.

Данные прямых наблюдений высоты снежного покрова, запаса снега и запаса талой воды свидетельствуют о тенденции снижения величин данного показателя с запада на восток.

Результаты исследования значений рН талой воды из проб снега, собранных в районе исследований, характеризуются мозаичностью распределения показателей кислотности снеговой воды.

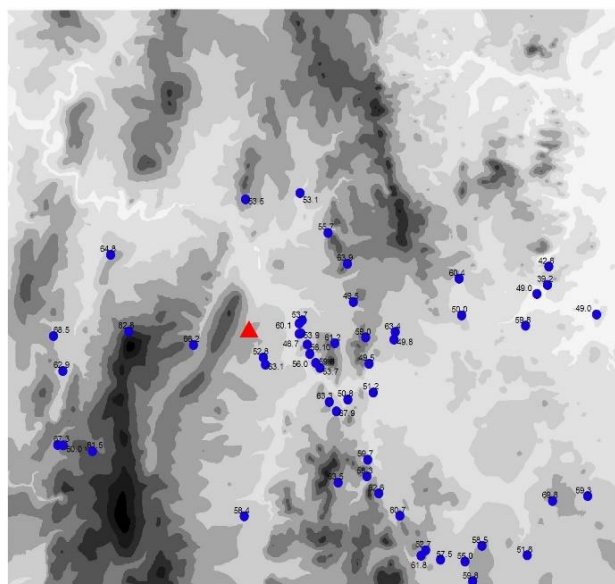


Рисунок 2 – Картосхема района исследований, составленная на основе цифровой модели рельефа) и данных снегомерных наблюдений. Точками синего цвета обозначены места измерения высоты снежного покрова.

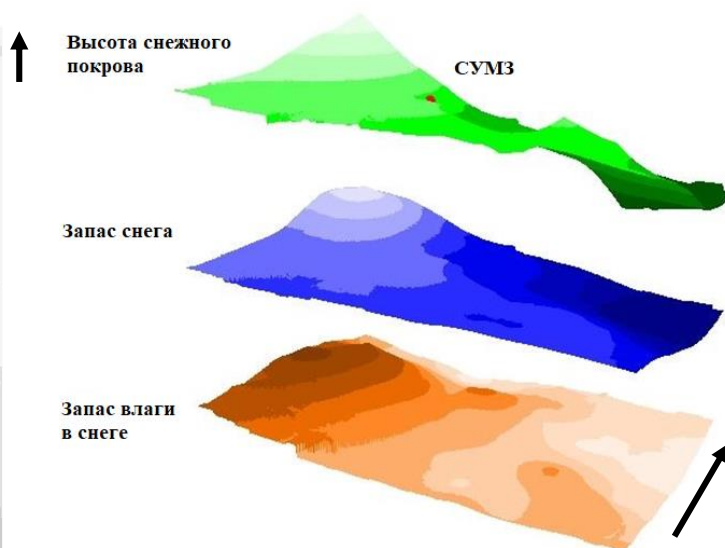


Рисунок 3 – Поверхности тренда, характеризующие изменение величин следующих показателей: высота снежного покрова, запас снега, запаса снеговой воды.

Установлено, что вблизи СУМЗа величины данного показателя находятся в пределах 6.3–6.8 (близкое к нейтральной реакции среды), что соответствует значениям в точках сбора образцов в западной части района исследований, которая относится к фоновой зоне. Некоторое снижение величин рН наблюдается в восточной (снижение до 5.68) и юго-восточной (снижение до 5.17) частях района исследований.

Анализ данных фитотоксичности снеговой воды также свидетельствует о том, что в основном в зоне вблизи СУМЗа и в фоновой зоне (в западной части района исследований) снеговая вода не является токсичной. Пространственное распределение значений данного показателя в восточной части района исследований также характеризуется определенной

мозаичностью. Причинами такого характера распределения показателей в пространстве могут быть дополнительные источники загрязнения: автотранспорт и селитебные зоны, включающие небольшие предприятия.

Необходимо отметить, что характер продвижения воздушных масс с запада на восток в районе исследований и особенности рельефа (понижение от СУМЗа к г. Екатеринбург) формирует характерную неоднородность перераспределения как осадков, так и загрязняющих веществ в районе исследований. Влияние этих факторов в сочетании с действием Среднеуральского медеплавильного завода, других промышленных предприятий Первоуральско-Ревдинского промышленного узла, авто- и ж/д транспорта, а также г. Екатеринбурга, находящегося вблизи восточной границы, обусловили формирование зоны с более высоким уровнем антропогенной нагрузки в восточной части района исследований по сравнению с таковой в западной.

#### **Глава 4. Пространственно-временная динамика состояния лесных насаждений в районе исследований в конце XX – начале XXI века**

Исследования динамики изменений экологического состояния лесных насаждений, основанных на спектральных характеристиках лесного полога в зоне действия аэропромышленного загрязнения Первоуральско-Ревдинского промышленного узла выполнены с использованием цифровых космических снимков, полученных с серии спутников Landsat TM за период с 1988 по 2020 г. Изменения санитарного состояния лесных насаждений, включая изменения сомкнутости лесного полога, вызванного усыханием, отпадом, частичным уничтожением, а также длительным воздействием поллютантов, выражающимися в дефолиации и дехромации хвои или листьев, должны сопровождаться изменением значений спектральных характеристик полога лесного насаждения.

В качестве источников данных о лесных насаждениях были использованы материалы лесоустройства 1996–1999 г. Билимбаевского, Верх-Исетского, Березовского, Невьянского и Нижне-Сергинского лесничеств Свердловской области и данные наземных обследований искусственных насаждений сосны на пробных площадях, заложенных на исследуемой территории в 1995–1996 гг. (Фомин, Шавнин, 2001; Фомин, 2009).

Район исследования характеризуется тем, что насаждения с преобладанием в составе сосны и березы представлены во всех частях исследуемой территории. Насаждения с преобладанием в составе ели и пихты расположены в основном в юго-западной части района – на хребте Шайтанский Увал (вдоль западной границы территории СУМЗа, в районе населенного пункта Гусевка). Насаждения с преобладанием осины встречаются в основном в западной части исследуемой территории.

Значения обобщенного показателя состояния (ОПС), рассчитанного на основе морфометрических характеристик древостоев на 15 постоянных пробных площадях (Фомин, 1998), и значения усовершенствованного индекса влажности EWDI, свидетельствует о высоком уровне линейной зависимости между значениями ОПС и индекса EWDI (рис. 4). Коэффициент корреляции Пирсона равен -0.911 на уровне значимости менее 0.05. Отрицательная величина коэффициента корреляции свидетельствует об обратной зависимости значений показателей. Улучшение состояния характеризуется увеличением значений обобщенного показателя состояния и, соответственно, уменьшением значений индекса EWDI.

Одним из ключевых вопросов, связанных с использованием индекса EWDI, является вопрос лабильности его значений под влиянием других факторов, например, влажности, наличия облачности или дымки. Анализ пространственных закономерностей выпадения осадков в районе исследований в холодный период года был связан с одним из аспектов данного вопроса. По данным количества осадков и средней температуры воздуха за год и май – август можно видеть тренд снижения количества осадков с 1998 по 2013 гг. с

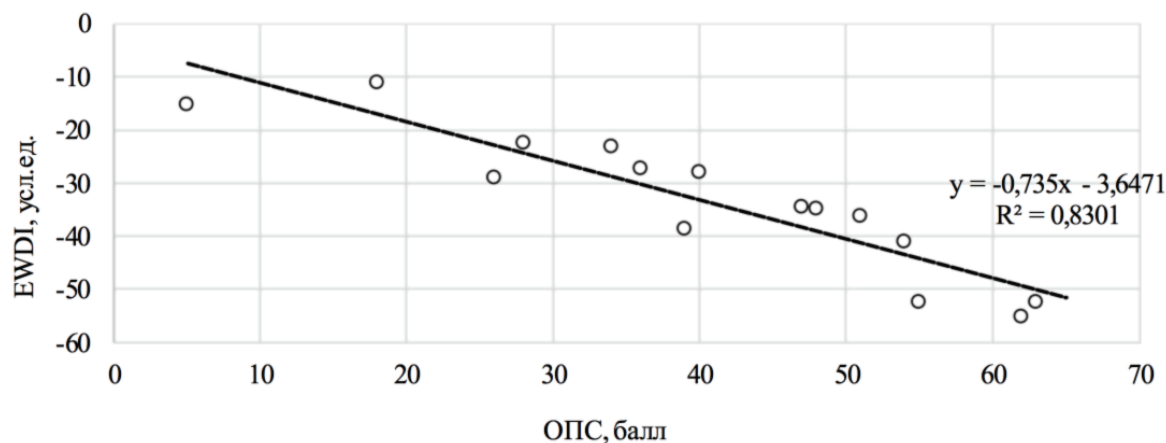


Рисунок 4 – Зависимость значений индекса EWDI (1996 г.) от величин обобщенного показателя состояния сосновых древостоев на пробных площадях в 1995–1996 гг.

локальным минимумом с 2010 по 2013 гг., установлены локальные максимумы средних величин температуры за май – август в 1998, 2010, 2012 и 2016 гг. и ярко выраженный минимум значений данного показателя в 2002, наблюдается незначительно выраженный тренд увеличения значений показателя за примерно полувековой период наблюдений.

На рисунке 5 приведены графики, характеризующие изменение значений индекса EWDI на контрольной (ПП-4) и импактной (ПП-9) пробных площадях за период с 1990 по 2020 гг. Динамика значений EWDI на этих двух участках кардинально отличается. На контрольной пробной площади наблюдался незначительный рост значений показателя с последующим снижением после 2010 г., а на импактной пробной площади произошло снижение значений EWDI более чем в два раза за период с 1990 по 2020 гг. Это означает, что состояние древостоев на ПП-9 за это период улучшилось. На контрольной ПП-4 в целом состояние не изменилось. Необходимо отметить, что к 2010 г. СУМЗ завершил переход на новые технологии производства продукции, которые характеризуются меньшими объемами выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

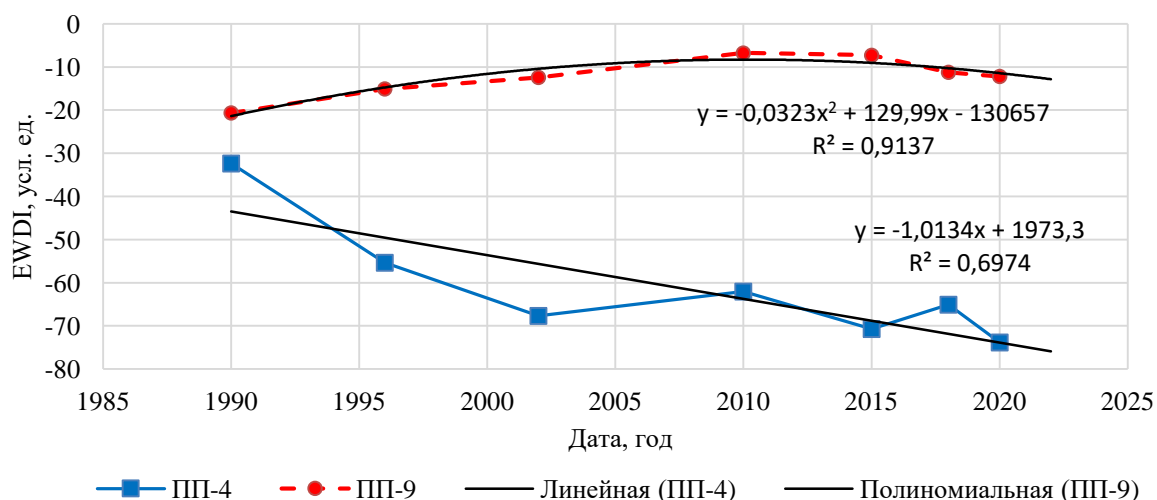


Рисунок 5 – Изменение значений индекса EWDI контрольной ПП-4 (фоновая зона) и импактной ПП-9 (импактная зона) пробных площадей за период с 1990 по 2020 гг.

Оценку состояния лесных насаждений с преобладанием в составе сосны, березы, ели, пихты и осины на исследуемой территории в пределах, выделенных от границы СУМЗа зон, с использованием индекса EWDI проводили на основе сетки лесных выделов материалов лесоустройства. Для каждого выдела с преобладанием

перечисленных выше древесных пород рассчитывался индекс EWDI с использованием снимков разных лет.

В работе были использованы рекомендации по выделению зон, характеризующих стадии дигрессии лесных насаждений: фоновая 30 км зона, буферные 4 и 7 км и импактные 1 и 2 км (Воробейчик, Кайгородова, 2017).

На рисунке 6 приведены графики зависимости изменения значений улучшенного индекса влажности по зонам в разные годы для сосновых и березовых древостоев за исследуемый период. Аналогичные данные получены для еловых, пихтовых и осиновых насаждений.

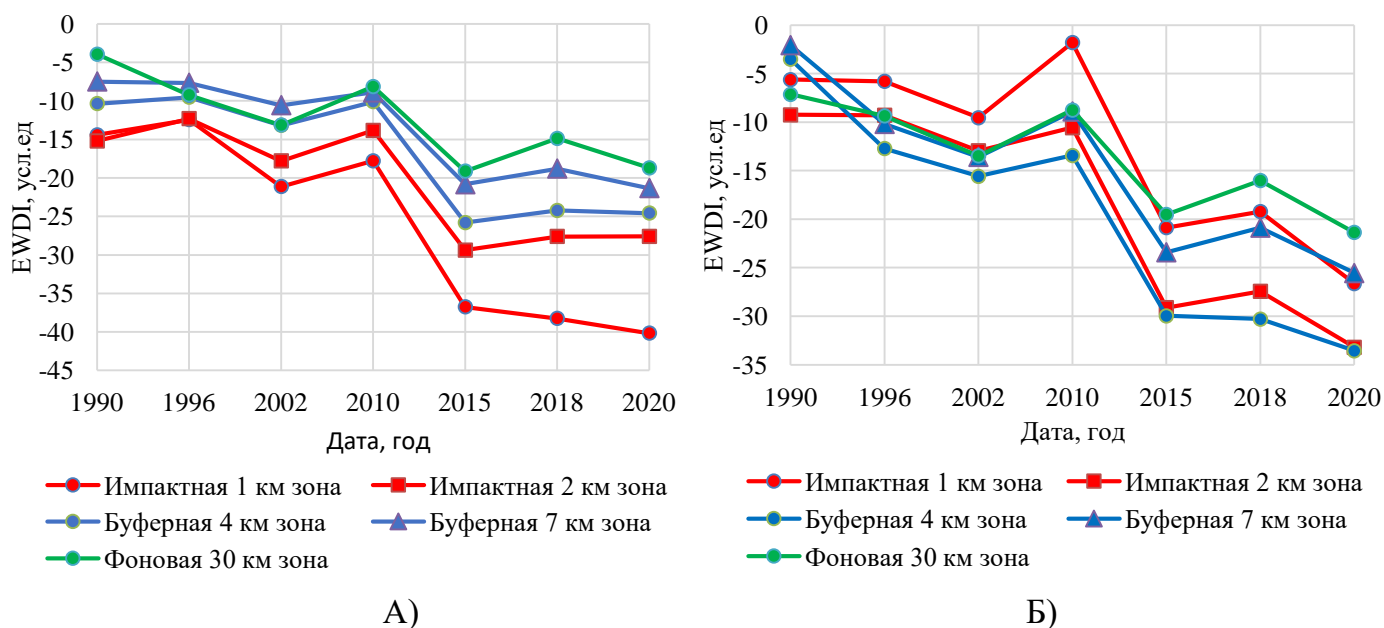


Рисунок 6 – Графики изменения значений индекса EWDI в разных зонах аэропромышленного загрязнения для насаждений: А) – сосновых; Б) – березовых

Полученные данные свидетельствуют о снижении значений показателя EWDI за 30-летний период. При этом на графике можно выделить 2 фазы: менее крутое снижение с локальным максимумом в 2010 г. и более крутое снижение после 2010 г. Одним из объяснений локального максимума в 2010 г. является формирование специфических погодных условий – сокращение количества осадков в мае – августе и локальный максимум температуры. Данную особенность индекса EWDI следует учитывать при исследовании состояния насаждений.

В целом за исследуемый тридцатилетний период состояние сосновых и березовых насаждений улучшилось и наиболее значительные улучшения происходили после 2010 г., когда СУМЗ перешел на новые технологии изготовления продукции с меньшим объемом выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Аналогичные закономерности установлены для еловых, пихтовых и осиновых насаждений. Установленные факты улучшения состояния лесных насаждений сразу после уменьшения количества выбросов согласовывается с ранее проведенными исследованиями в данном районе (Воробейчик, Кайгородова, 2017).

На рисунках 7 и 8 представлены картосхемы состояния сосновых насаждений в 1996 и 2020 гг.

Картосхемы, приведенные на рисунках 7–8 подтверждают описанные выше закономерности изменения состояния сосновых насаждений на исследуемой территории. На данных рисунках можно видеть значительные по площади области улучшения состояния лесных насаждений с преобладанием в составе сосны. При этом часть областей с локальным ухудшением состояния, как правило, находится вблизи селитебных зон.

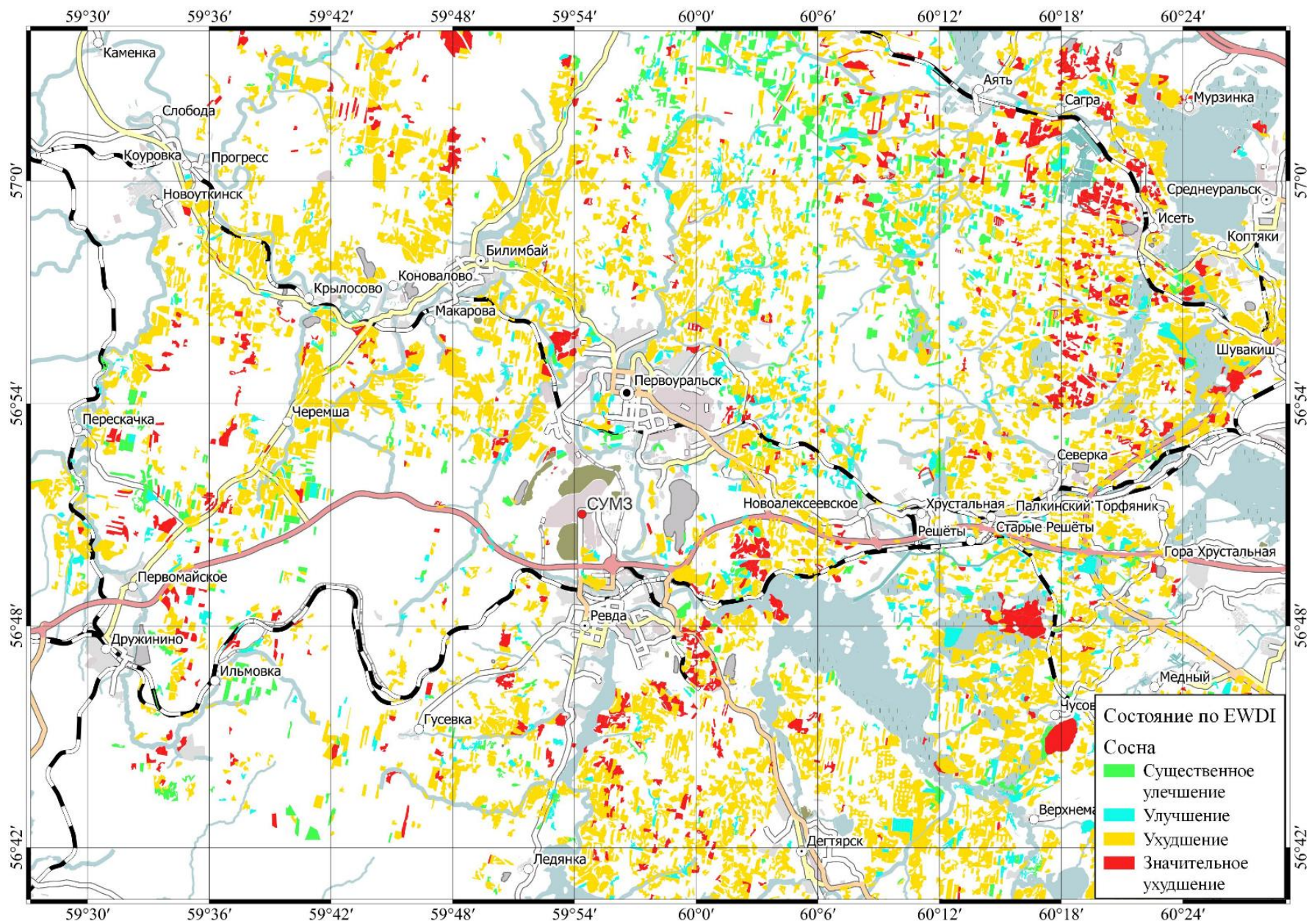


Рисунок 7 – Картограмма состояния сосновых насаждений в 1996 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.

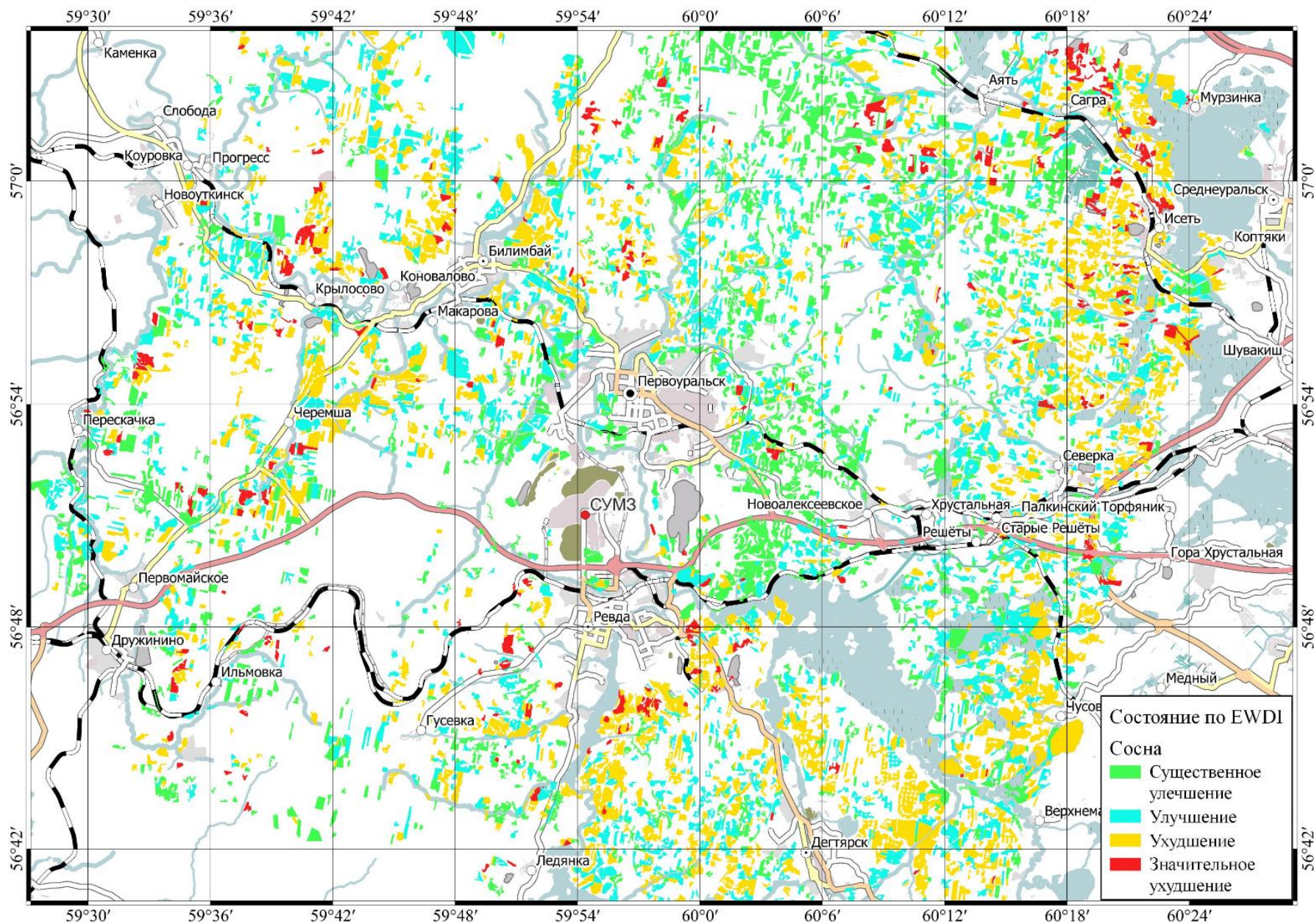


Рисунок 8 – Картограмма состояния сосновых насаждений в 2020 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



В таблице приведены данные динамики площадей для сосновых насаждений по значениям индекса EWDI по состоянию на 1996 и 2020 г. Аналогичные закономерности установлены для березовых, еловых, пихтовых и осиновых насаждений.

Таблица – Динамика изменения площадей сосновых насаждений по категориям состояния, определенных по значению усовершенствованного индекса влажности EWDI на 2020 г.

Категория состояния	Год оценки состояния				Динамика изменения площади на 2020 г.		
	1996		2020		га	% от 1996 г.	% от общей площади
	га	%	га	%			
Значительное улучшение	5915,0	8,73	21817,0	32,18	+15902,0	+268,8	+23,5
Улучшение	6112,0	9,02	22514,0	33,22	+16402,0	+268,4	+24,2
Ухудшение	47266,0	69,72	20576,0	30,35	-26690,0	-56,5	-39,4
Значительное ухудшение	8496,0	12,53	2883,0	4,25	-5613,0	-66,1	-8,3
Итого	67790,0	100,0	67790,0	100,0			

Полученные данные свидетельствуют о значительном улучшении состояния насаждений за 30-летний период. Площадь сосновых насаждений со значительным улучшением состояния к 2020 г. увеличилась на 15902,0 га, что соответствует 268,8 % площади сосновых насаждений аналогичного состояния 1996 г. или увеличению на 23,5 % общей площади сосновых насаждений. Уменьшение площади сосновых насаждений с ухудшенным состоянием к 2020 г. составило 26690,0 га, или 56,5 % общей площади насаждений. Общее состояние сосновых насаждений в 2020 г. характеризуется общим улучшением, насаждения со значительным ухудшением состояния составляют 4,25 % общей площади сосновых насаждений. Аналогичная динамика площадей установлена для березовых, еловых, пихтовых и осиновых насаждений.

Одним из недостатков индекса EWDI является его чувствительность к облачности. На картохемах состояния лесных насаждений 2018 г. можно видеть участки лесных насаждений с существенным ухудшением их состояния в западной части района исследований в районе населенных пунктов Первомайское, Перескачка и Черемша. Объяснением данного факта является наличие облачности на космическом снимке в этой части района исследований.

Полученные картографические материалы на 2010 г. указывают на ухудшение состояния лесных насаждений. Как было установлено, данный год был аномальным с точки зрения формирования погодных условий. Данный факт ухудшения состояния лесных насаждений, обусловленный формированием относительно экстремальных погодных условий, требует учета при проведении планирования исследований для оценки состояния лесных насаждений, находящихся в зоне действия аэропромышленных загрязнений. Общие рекомендации по учету двух факторов (облачности и погодных условий): устранение из анализа участков с наличием облачности или дымки, учет или исключение из обработки и анализа снимков, сделанных в период аномальных погодных условий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг состояния лесных экосистем, находящихся в условиях действия комплекса антропогенных факторов, включая аэропромышленные загрязнения на территориях вокруг крупных промышленных центров, является одним из ключевых элементов комплекса мероприятий по сохранению окружающей среды и предотвращению

негативных воздействий на лесные экосистемы. Динамический характер антропогенных факторов, обусловленный как изменением уровня воздействий, так и устранением или появлением новых факторов, требует совершенствования уже существующих и разработки новых методик оценки состояния лесных насаждений, позволяющих учитывать изменение их состояния во времени.

На территории, прилегающей к Первоуральско-Ревдинскому промышленному узлу, проведено исследование состояния лесных насаждений с использованием результатов оценки состояния сосновых древостоев на основе данных прямых наземных измерений на пробных площадях, лесостроительных материалов и полученных в ходе работы данных дистанционного зондирования Земли за период с 1990 до 2020 гг. Основным источником аэропромышленных выбросов в данном районе является Среднеуральский медеплавильный завод.

В ходе проведенных работ была создана картосхема антропогенных ландшафтов по классификации Ф. Н. Милькова и состояния лесных насаждений района исследований на основе данных комплексной оценки состояния сосновых древостоев по морфометрическим характеристикам в середине 1990-х годов и картографических материалов OSM ([openstreetmap.org](http://openstreetmap.org)). Данная картосхема позволяет оценить характер и уровень воздействия комплекса антропогенных факторов на экосистемы на разных участках исследуемой территории во второй половине 1990-х годов.

Анализ взаимосвязи значений усовершенствованного индекса влажности EWDI и обобщенного показателя состояния сосновых древостоев на основе данных наземных измерений морфометрических характеристик деревьев на пробных площадях свидетельствует о достоверно высоком уровне линейной зависимости величин анализируемых параметров. Таким образом, усовершенствованный индекс влажности EWDI позволяет адекватно оценить состояние древостоев, находящихся в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами медеплавильного производства.

Проведены снегомерные измерения в районе исследований после завершения перехода Среднеуральского медеплавильного завода на новую технологию производства продукции, позволившую значительно сократить объемы выбросов поллютантов в атмосферу. Уровень кислотности и фитотоксичности снеговой воды свидетельствует о том, что значения показателей в импактной зоне вокруг Среднеуральского медеплавильного завода соответствуют значениям кислотности и фитотоксичности воды в фоновой зоне в западной части района исследований.

Установлена тенденция улучшения состояния лесных насаждений с преобладанием в их составе основных лесообразующих древесных пород (сосна, береза, ель, пихта, осина), расположенных на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода за период с 1990 по 2020 г. Картосхемы состояния лесных насаждений, созданные на основе усовершенствованного индекса влажности EWDI, позволяют оценить пространственные закономерности изменения их состояния в разных частях района за исследуемый период. При использовании индекса EWDI для оценки состояния лесных насаждений необходимо учитывать наличие облачности и аномальных погодных условий (сокращения количества осадков и повышение средней температуры воздуха в теплый период года). При проведении оценки состояния необходимо исключать из анализа участки с облачностью, а также учитывать погодные условия в период проведения космической съемки.

Разработанная в ходе исследований методика оценки состояния лесных насаждений с использованием усовершенствованного индекса влажности EWDI может быть использована для создания систем экологического мониторинга лесов, находящихся в условиях загрязнения атмосферы выбросами промышленных предприятий цветной металлургии. Созданные в ходе проведенных исследований картосхемы могут быть

использованы для организации лесохозяйственной деятельности в части проведения мероприятий, направленных на улучшение санитарного состояния лесных насаждений.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

1. Фомин, В. В. Экологическая оценка территории в зоне действия атмосферных промышленных загрязнений медеплавильного производства / В. В. Фомин, **А. А. Николаев** // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 4(83). – С. 18-20.
2. **Николаев, А. А.** Оценка состояния экосистем промышленных территорий на основе данных снегомерных исследований / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Естественные и технические науки. – 2021. – № 2(153). – С. 49-56.
3. **Николаев, А. А.** Преобразование цифровых данных космической съемки алгоритмом Tasseled Cap при определении структуры лесных насаждений / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 9(123). – URL: <https://research-journal.org/archive/9-123-2022-september/10.23670/IRJ.2022.123.77>
4. **Николаев, А. А.** Состояния лесных насаждений и их динамика в зоне аэропромышленного загрязнения / А. А. Николаев, В. В. Фомин // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2023. – № 3(72). – С. 95-103.

### Публикации в других изданиях

1. Фомин, В. В. Оценка лесных ресурсов с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения / В. В. Фомин, **А. А. Николаев** // Экологическое равновесие: Антропогенные изменения географической оболочки Земли, охрана природы. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет имени А.С. Пушкина, 2013. – С. 113-116.
2. **Николаев, А. А.** Экологическая оценка территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГАУ, 2021. – С. 151-156.
3. **Николаев, А. А.** Определение структуры лесных насаждений при использовании трансформации Tasseled Cap по данным ДДЗ высокого пространственного разрешения IKONOS / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГАУ, 2021. – С. 147-151.
4. **Николаев, А. А.** Оценка состояния лесных экосистем при использовании спутниковых данных / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Инициативы молодых - науке и производству : сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции для молодых ученых и студентов. – Пенза: ПГАУ, 2021. – С. 126-128.
5. **Николаев, А. А.** Трансформации изображения Tasseled Cap для данных ДДЗ полученных со спутника IKONOS / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Проблемы и мониторинг природных экосистем : сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: ПГАУ, 2021. – С. 106-109.
6. **Николаев, А. А.** Состояние лесных экосистем и их динамика / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Проблемы и мониторинг природных экосистем : сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: ПГАУ, 2022. – С. 59-62.

7. **Николаев, А. А.** Состояние мягколиственных насаждений в импактной зоне медеплавильного производства / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Инициативы молодых - науке и производству : сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Пенза: ПГАУ, 2022. – С. 348-351.

8. **Николаев, А. А.** Влияние медеплавильного производства на состояние сосновых насаждений / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Актуальные проблемы природопользования и природообустройства : сборник статей V Международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГАУ, 2022. – С. 165-168.

9. **Николаев, А. А.** Лесные экосистемы в промышленно развитых регионах, оценка состояния по данным ДДЗ / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России : сборник статей XX Международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГАУ, 2022. – С. 143-146.

10. **Николаев, А. А.** Чувствительность усовершенствованного индекса влажности EWDI к состоянию лесных насаждений в зоне аэропромышленного загрязнения / А. А. Николаев, И. О. Николаева // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России : материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. – С. 278-282.