

ФГБОУ ВО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:

доктор биологических наук, доцент

Фомин Валерий Владимирович

Екатеринбург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ	
КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЛЕСОУСТРОЙСТВА	
И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ.....	
1.1 Дистанционное зондирование Земли	11
1.2 Факторы, влияющие на результаты дешифрирования аэрокосмических снимков	18
1.3 Использование космических снимков при учете лесного фонда для целей лесоустройства	22
1.4 Обзор систем дистанционного зондирования	31
1.5 Технологии и методики обработки современных космических снимков	53
1.6 Классификация изображений	58
1.7 Особенности дешифрирования растительного покрова с использованием данных дистанционного зондирования	63
1.8 Использование спектральных индексов при исследовании лесных насаждений	68
1.9 Оценка состояния древесной растительности с использованием данных дистанционного зондирования	70
ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	
2.1 Характеристика района исследований	76
2.2 Программа работ	80
2.3 Методики исследований	81
2.3.1 Проведение снегомерной съемки и сбора проб снега	81
2.3.2 Определение фитотоксичности и кислотности снеговой воды	82
2.3.3 Анализ данных метеонаблюдений	83
2.3.4 Создание картосхемы антропогенных ландшафтов и состояния лесов района исследований	85

2.3.5	Обработка космических снимков	85
2.3.6	Анализ пространственно-временной динамики лесных насаждений с использованием данных дистанционного зондирования...	88
2.4	Характеристика экспериментальных объектов и объем выполненных работ	90
ГЛАВА 3 СОСТОЯНИЕ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ПЕРВОУРАЛЬСКО-РЕВДИНСКОМУ УЗЛУ В 1990-Х – НАЧАЛЕ 2000-Х ГОДОВ		92
3.1	Экологическое зонирование территории, прилегающей к Первоуральско-Ревдинскому промышленному узлу	93
3.2	Пространственные закономерности распределения осадков района исследований	98
ГЛАВА 4 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ В РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В КОНЦЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВЕКА		108
Заключение		128
Литература		131
Приложения		151

ВВЕДЕНИЕ

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 (Жири́н, 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.

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 лесобразующих 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.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Полученные в ходе проведенных исследований результаты позволили углубить представления о демутационном 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 исследований. 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. 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).

Публикации. 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.

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 картосхемы 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.

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.

Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования Уральского государственного лесотехнического университета в ходе выполнения следующих научно-исследовательских проектов:

- РФФИ № 11-04-12114-офи-м. «Оценка и прогнозирование динамики лесных ресурсов с использованием космических снимков»;
- FEUG-2023-0002 «Естественно-научные и технологические аспекты рационального использования, прогнозирования и управления лесными

ресурсами на основе генетического подхода к классификации типов леса в условиях современного изменения климата и антропогенных воздействий».

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность доценту кафедры экологии и природопользования Мариной Наталье Валентиновне и ведущему инженеру Новоселовой Галине Николаевне за помощь в определении уровня фитотоксичности и рН снеговой воды.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЛЕСОУСТРОЙСТВА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

1.1 Дистанционное зондирование Земли

Богатство природных ресурсов Российской Федерации является одной из важнейших особенностей страны. Огромные лесные просторы, простирающиеся на территории России, представляют собой огромный потенциал для экономического развития. Для того чтобы эффективно использовать этот ресурс, необходимо провести подробную инвентаризацию лесов и оценку их состояния. Именно здесь на помощь приходит дистанционное зондирование (ДЗ), предоставляя возможность получить информацию о лесных территориях на основе анализа спутниковых снимков.

Большое разнообразие почвенно-климатических условий и породного состава лесов требует разработки методов обработки и анализа ДЗ, позволяющих учитывать региональную специфику. Применение данных космической съемки актуально для лесного хозяйства, поскольку при использовании материалов ДЗ возможно изучение динамики покрытых лесом земель и их границ, использование в качестве основы для разработки тематических лесных карт, лесоустройства, инвентаризации и оценки состояния лесных насаждений и других актуальных задач.

Термином «дистанционное зондирование» обозначают широкий спектр данных об объекте без непосредственного прямого контакта наблюдателя, которые получены с использованием электромагнитного излучения (Rees, 2001). Применение первых попыток съемки земной поверхности в IV веке до н. э. возможно назвать началом истории в дистанционном зондировании и обусловлено созданием камеры-обскуры Аристотелем. При этом немаловажным аспектом развития дистанционного зондирования является развитие теории оптики в XVII веке.

Однако существенный прогресс в этой области был достигнут только в XIX веке с появлением фотографии. Именно изобретение фотографии привело к разработке новых методов дистанционного зондирования, в частности аэрофотосъемки. Первый аэроснимок был сделан в 1858 г. с воздушного шара Гаспаром Феликсом Турношаном. В России первые аэрофотоснимки были получены в 1886 г. с воздушного шара поручиком А. М. Кованько (Лабутина, 2004). Наряду с развитием аэрофотосъемки в XIX веке были проведены важные исследования электромагнитного излучения вне видимой части спектра. В 1800 г. Уильям Гершель обнаружил инфракрасное излучение, а в 1801 г. Иоганн Вильгельм Риттер – ультрафиолетовое. В 1886 г. Генрих Герц продемонстрировал существование радиоволн, а в 1865 г. Джеймс Клерк Максвелл разработал электромагнитную теорию, объединяющую все эти явления. В XX веке дистанционное зондирование получило дальнейшее развитие благодаря достижениям в области электроники, авиации и космонавтики. Были разработаны новые датчики и платформы, которые позволили осуществлять дистанционное зондирование в различных частях электромагнитного спектра и с различным разрешением.

Развитие космических технологий привело к созданию спутников дистанционного зондирования, которые позволили получать глобальные данные о состоянии Земли и ее окружающей среды. В настоящее время дистанционное зондирование является важным инструментом для изучения Земли, ее окружающей среды и ресурсов. Оно широко применяется в различных областях, включая геологию, гидрологию, метеорологию, океанографию, сельское хозяйство, лесное хозяйство и охрану окружающей среды.

Следующий шаг к тому, что в настоящее время понимают под дистанционным зондированием, был связан с развитием самолетостроения в начале XX века. Потенциальные возможности летательных аппаратов для получения данных о земной поверхности в виде аэрофотоснимков были реализованы уже в 1909 г. (Rees, 2001).

Аэросъемка в России имеет давнюю историю и началась в первые годы Советской власти. В 1918 г. в районе города Твери была выполнена первая фотосъемка местности площадью 100 квадратных километров.

В дальнейшем аэросъемка активно использовалась для различных нужд народного хозяйства. В 1919 г. был принят Декрет об учреждении Высшего геодезического управления, которое ускорило использование аэрофотосъемки для решения актуальных задач.

В 1920-х годах в СССР было создано несколько авиационных отрядов, оснащенных самолетами с фотоаппаратами. Эти отряды выполняли аэросъемку для различных целей, в том числе для составления топографических карт, изучения природных ресурсов и планирования строительства новых объектов (Лабутина, 2004).

В 1930-х годах в СССР была создана Особая авиационная группа Главного управления геодезии и картографии (ГУГК), которая занималась исключительно аэросъемкой. В состав группы входили несколько авиационных отрядов, оснащенных современными самолетами и фотоаппаратами. ОАГ ГУГК выполняла аэросъемку для различных целей, в том числе для составления топографических карт, геологической разведки, лесоустройства и проектирования строительства новых объектов. Аэросъемка становится новым методом для получения данных о земной поверхности в труднодоступных районах. Дальнейшим толчком в развитии дистанционного зондирования стала Вторая мировая война. В этот период стала использоваться пленка, позволяющая получать спектрональные снимки.

В годы Первой мировой войны аэросъемка использовалась для разведывательных нужд, после войны – для картографирования, землеустройства, лесоустройства, планирования строительства дорог и других объектов инфраструктуры.

В 1930-1940-е годы аэросъемка стала применяться для геологических исследований. Аэроснимки позволили выявить новые месторождения полезных ископаемых, определить их границы и оценить запасы.

В годы Великой Отечественной войны аэросъемка использовалась для разведки местности, корректировки артиллерийского огня и планирования военных операций. После войны аэросъемка продолжила использоваться для различных целей.

После войны аэросъемка получила широкое применение в сельском хозяйстве. Аэроснимки использовались для планирования сельскохозяйственных работ, определения урожайности, выявления вредителей и болезней растений.

Развитие методов специальных исследований и тематического картографирования получило мощный толчок с организацией в 1944 г. лаборатории аэрометодов Академии наук СССР (Книжников и др., 2011). Событие ознаменовало начало нового этапа в изучении Земли из космического пространства. Лаборатория занималась разработкой и совершенствованием методов аэрофотосъемки, а также использованием аэрофотоснимков для различных целей, включая картографирование, геологию, сельское хозяйство и другие отрасли.

В 1950-х годах в СССР началось применение цветной аэросъемки. Цветная аэросъемка позволила получить более подробную информацию о местности и природных ресурсах.

В 1960-х годах в СССР началось применение космической аэросъемки. Космическая аэросъемка позволила получать снимки Земли более высокого разрешения и с более широким охватом территории. Космические аэрофотоснимки использовались для различных целей (Кравцова и др., 2002). Космические снимки позволили получить ценную информацию о нашей планете, недоступную ранее для исследователей. Они позволили изучать глобальные процессы, такие как изменения климата, движение воздушных масс, течения в океанах и т. д.

В 1970-х годах в СССР началось применение цифровой аэросъемки. Цифровая аэросъемка позволила получать цифровые аэрофотоснимки, которые можно было обрабатывать с помощью компьютеров.

В 1980-х годах в СССР была создана единая система аэросъемки. Единая система аэросъемки позволила координировать деятельность различных организаций, занимавшихся аэросъемкой, и обеспечивать эффективное использование аэроснимков для различных целей.

В 1980-х годах мир пережил значительные технологические достижения, которые кардинально изменили способы получения и использования аэрокосмической информации. В этой динамичной эпохе аэрокосмические снимки стали важным инструментом для изучения и картографирования поверхности Земли.

С развитием компьютерных технологий, в частности персональных компьютеров и программного обеспечения для обработки изображений, появилась возможность осуществлять быструю и эффективную компьютерную обработку снимков. Этот прогресс привел к созданию новых методов, алгоритмов и программ, которые позволили извлекать более точную и всестороннюю информацию из аэрокосмических снимков.

В 1980-х годах также наблюдался рост интеграции аэрокосмической информации в различные области науки и техники. В этой связи возникла необходимость в разработке новых геоинформационных технологий, которые могли бы эффективно обрабатывать, хранить, визуализировать и анализировать большие объемы аэрокосмической информации.

Эти достижения оказали значительное влияние на развитие картографии. Аэрокосмические снимки стали основой для создания высокоточных тематических карт, которые использовались в различных областях, таких как планирование землепользования, мониторинг окружающей среды, управление природными ресурсами и т. д.

Помимо вышеупомянутых достижений, в 1980-х годах были совершены и другие важные шаги в области аэрокосмической информации. Например, были запущены спутники нового поколения, которые позволяли осуществлять более точную и детальную съемку поверхности Земли. Также произошел рост

международного сотрудничества в области аэрокосмических исследований, что привело к совместным проектам и обмену знаниями между исследователями.

В целом 1980-е годы стали периодом значительного прогресса в получении, обработке и использовании аэрокосмической информации. Эти достижения заложили основу для дальнейшего развития этой области и оказали влияние на различные сферы науки, техники и картографии.

В 1990-х годах в России была создана новая система аэросъемки. Новая система аэросъемки была основана на принципах рыночной экономики. В новой системе аэросъемки участвовали как государственные, так и частные организации. Новая система аэросъемки позволила повысить качество и эффективность аэросъемки и расширить сферу ее применения.

Начало XXI века ознаменовалось скачкообразным развитием технологий дистанционного зондирования Земли. Одним из основных факторов этого стало существенное увеличение количества данных, получаемых со спутников. К началу 2020 г. на орбите находилось более 2500 искусственных спутников Земли, оснащенных различными датчиками для получения данных о нашей планете. Эти датчики могут измерять различные параметры, такие как температура поверхности, отраженная солнечная энергия, плотность растительности и влажность почвы.

Развитие технологий волоконной оптики привело к созданию новых материалов и компонентов для оптико-электронных систем. Это позволило значительно улучшить пространственное и спектральное разрешение съемочных систем и получить более подробные и точные изображения. Благодаря этому стало возможным выявлять и изучать ранее недоступные объекты и явления.

Другим важным фактором развития дистанционного зондирования Земли стало создание мощных компьютеров и высокопроизводительных алгоритмов для обработки и анализа данных. Это позволило автоматизировать многие процессы, которые раньше выполнялись вручную, и существенно сократить время, необходимое для получения конечных результатов.

Кроме того, значительным прорывом стало развитие технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Это позволило создать системы, которые способны автоматически классифицировать объекты и явления на основе данных дистанционного зондирования Земли. Это открывает новые возможности для изучения и мониторинга нашей планеты и позволяет решать широкий спектр задач, таких как прогнозирование погоды, обнаружение лесных пожаров и оценка урожайности сельскохозяйственных культур.

В целом достижения в области дистанционного зондирования Земли за последние два десятилетия были очень впечатляющими и позволили существенно улучшить наше понимание нашей планеты. Эти технологии продолжают развиваться очень быстрыми темпами, и вполне вероятно, что в ближайшие годы мы увидим еще больше прорывов в этой области.

В настоящее время аэросъемка используется для решения различных задач в различных отраслях экономики. Она применяется в геодезии, картографии, землеустройстве, лесоустройстве, градостроительстве, сельском хозяйстве, геологии, экологии и т. д.

Современные технологии аэросъемки позволяют получать снимки высокого разрешения, которые могут использоваться для создания подробных карт, планов и моделей местности. Аэроснимки используются для оценки состояния природных ресурсов, мониторинга окружающей среды, управления сельскохозяйственными угодьями и т. д.

Аэросъемка является важным инструментом для решения многих задач в различных отраслях экономики. Она позволяет получать ценную информацию о местности, которая может использоваться для принятия решений и планирования дальнейших действий.

Необходимо отметить, что в настоящее время дистанционное зондирование Земли из космоса является одним из важнейших источников информации о нашей планете. Космические снимки используются для различных целей, включая картографирование, геологию, сельское хозяйство, лесоводство, охрану окружающей среды и другие отрасли. Дистанционное зондирование Земли также

играет важную роль в мониторинге природных ресурсов и в прогнозировании стихийных бедствий.

Ниже приведен список некоторых российских и зарубежных авторов, работы которых посвящены различным аспектам использования данных дистанционного зондирования земли из космоса для исследования лесных насаждений, проведения мониторинга хозяйственной деятельности в лесах и анализа состояния лесных экосистем: Е. Л. Кринов (1947); К. Я. Кондратьев (1982); П. Кронберг (1988); Е. П. Данюлис (1989); В. И. Сухих (2001, 2002, 2005); Н. Г. Харин (2003); А. С. Исаев (2009); С. А. Барталев (2015); В. Г. Бондур (2015); О. Н. Воробьев (2016); А. С. Плотникова (2019); Ф. В. Стыценко (2019); F. Lambin (1999); R. J. Rees (2001); R. Hall (2003); D. Lu (2004); D. S. Boyd (2005); L. Eklundh (2005); D. J. King (2005); M. L. Nordberg (2005); M. Tsutsumi (2005); R. Virk (2006); M. Batistella (2007); W. Chen (2007); T. Kajisa (2008); D. Lutz (2008); M.A. Wulder (2009); B. Matsushita (2010); T. Hermosilla (2016); S. Soliveres (2016); M. Mouchet (2017); F. Van der Plas (2018); F. Zhao (2018); D. J. King (2021) и др.

1.2 Факторы, влияющие на результаты дешифрирования аэрокосмических снимков

Космический снимок содержит информацию о состоянии объекта земной поверхности в момент съемки. Процесс дешифрирования основывается на определении физических характеристик объекта на снимке. Как правило, результат его обработки зависит от опыта оператора, типа распознаваемого объекта и качества съемки (Chandra, Ghosh, 2006). На результаты дешифрирования космических снимков большое влияние оказывают атмосфера (поглощение и перенос излучения в атмосфере, рассеивание электромагнитного излучения, взаимодействие излучения с поверхностью Земли), дата и время съемки, пространственное разрешение систем дистанционного зондирования), сенсор и платформа применяемой при проведении ДЗ, а также опыт оператора.

Солнечное излучение широко применяется в системах получения ДЗ и играет важную роль в формировании характеристик наблюдаемых объектов. Распространение солнечного излучения через атмосферу Земли сопровождается его частичным поглощением и рассеиванием. Основными газами, поглощающими солнечное излучение в атмосфере Земли, являются озон (O_3), пары воды (H_2O) и углекислый газ (CO_2) (Rees, 2001; Chandra, Ghosh, 2006).

Озон поглощает большую часть ультрафиолетового излучения Солнца, что защищает живые организмы от вредного воздействия этого излучения. Пары воды поглощают в основном инфракрасное излучение, а углекислый газ – в основном средневолновое инфракрасное излучение. Поглощение солнечного излучения в атмосфере зависит от длины волны излучения. Максимальное поглощение происходит в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, а наименьшее в видимой области.

При прохождении солнечного излучения через атмосферу происходит его частичное рассеивание. Рассеивание происходит из-за изменения направления распространения электромагнитных волн при взаимодействии с молекулами газов и присутствующими в атмосфере частицами (Rees, 2001; Chandra, Ghosh, 2006). Существует три основных типа рассеивания солнечного излучения в атмосфере:

- Рассеивание Релея – рассеивание, которое происходит на молекулах газов;
- Рассеивание Ми – рассеивание, которое происходит на аэрозольных частицах;
- Неселективное рассеивание – рассеивание, которое происходит на крупных частицах (например, пыль, облака).

Рассеивание солнечного излучения в атмосфере зависит от длины волны излучения, количества частиц и концентрации атмосферных газов, а также длины пути распространения излучения через атмосферу (Rees, 2001). Рассеяние Релея преобладает в коротковолновой части спектра, а рассеяние Ми – в длинноволновой части спектра. При взаимодействии солнечного излучения с поверхностью Земли выделяют три основных типа: отражение, поглощение и пропускание.

Отражение – это процесс, при котором солнечное излучение отражается от поверхности Земли и возвращается в космос.

Поглощение – это процесс, при котором солнечное излучение поглощается поверхностью Земли и превращается в тепло.

Пропускание – это процесс, при котором солнечное излучение проходит через поверхность Земли и достигает ее внутренней части. Соотношение, связывающее между собой три компонента излучения после его взаимодействия с поверхностью, можно получить из закона сохранения энергии. Свойства отраженного, поглощенного и пропущенного излучения будут отличаться в зависимости от типа поверхности. Интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, зависят от многих факторов, таких как время суток, географическая широта, высота над уровнем моря, состояние атмосферы и наличие облачности.

Особенности отражающей способности земной поверхности и расположенных на ней объектов характеризуются большой вариативностью в одной области спектра и в то же время практически неразделимы в другом спектре, который человеческий глаз не воспринимает. Например, при инфракрасном излучении объекты могут выглядеть совершенно иначе, чем в видимом свете. Это происходит потому, что разные материалы по-разному отражают и поглощают инфракрасное излучение, что создает уникальные сигнатуры, которые можно обнаружить с помощью специальных приборов. Эти сигнатуры могут использоваться для различных целей, например для обнаружения скрытых объектов, измерения температуры и анализа химического состава материалов.

Благодаря своей способности проникать в некоторые материалы инфракрасное излучение позволяет обнаруживать объекты, скрытые под землей, водой или другими объектами. Это делает его ценным инструментом для научных исследований и деятельности археологов, геологов и военных.

Инфракрасное излучение также используется для измерения температуры объектов. Измеряя интенсивность инфракрасного излучения, испускаемого

объектом, можно определить его температуру. Это используется в различных областях, один из которых – мониторинг окружающей среды.

Инфракрасное излучение при этом является невидимым для человеческого глаза, поэтому для его обнаружения необходимы специальные приборы, такие как инфракрасные камеры и спектрофотометры. Эти приборы преобразуют инфракрасное излучение в видимый свет или электрические сигналы, которые могут быть проанализированы. Обнаружение инфракрасного излучения имеет широкий спектр применений, в том числе в области безопасности, медицине, промышленности и научных исследованиях. Изменения амплитуды спектра отраженного излучения используются для анализа объектов на изображении (Rees, 2001).

Разные объекты на космических снимках формируют разную текстуру изображения, т. е. трансформация в определенной области снимка частоты изменений тона. Текстура изображения космического снимка ввиду закономерных расположений тоновых неоднородностей изображения формирует области, характеризующиеся пятнистой, однородной, полосчатой и другими характеристиками.

Лесные насаждения характеризуются чрезвычайно резкой текстурой, которая особенно проявляется в смешанных лесах. Это связано с частым пространственным изменением тона изображения, что обусловлено вариацией размера, формы деревьев, плотности лесного полога и других характеристик древостоев (Книжников и др., 2011).

Выделяют два основных типа лесных текстур:

– однородная текстура характерна для лесов, в которых преобладают деревья одного вида и возраста. В этом случае изображение леса на снимках имеет относительно однородный тон и структуру;

– пестрая текстура характерна для лесов, в которых произрастают деревья разных видов и возрастов. В этом случае изображение леса на снимках имеет неоднородный тон и структуру, что обусловлено различными размерами, формами и цветами деревьев.

Резкость текстуры лесных насаждений зависит от следующих факторов:

– разнообразия пород деревьев: в смешанных лесах встречаются деревья различных видов, каждый из которых имеет уникальную форму и цвет кроны. Это приводит к созданию пестрой картины, которая затрудняет восприятие общей текстуры леса;

– различия в возрасте деревьев: в лесу могут находиться деревья разного возраста: от молодых до старых. Молодые деревья обычно имеют более светлую крону, а старые – более темную. Это также создает контраст и делает текстуру леса более отчетливой;

– различия в густоте растительности: в лесах могут встречаться участки с различной плотностью растительности. Есть места, где деревья растут густо, а есть места, где они растут более разреженно. Это также влияет на текстуру леса, делая ее более резкой;

– наличия подлеска: в некоторых лесах присутствует подлесок, который представляет собой кустарники и другие растения, растущие под деревьями. Подлесок создает дополнительный контраст в текстуре леса, делая ее более сложной и интересной;

– рельефа местности. Леса, расположенные на крутых склонах, имеют более резкую текстуру, чем леса, расположенные на равнине.

Текстура лесных насаждений является важным диагностическим признаком при проведении лесоустроительных работ и лесопатологического мониторинга. Анализ текстуры лесных насаждений позволяет выявить участки леса, пораженные вредителями и болезнями, а также участки леса, подверженные риску возникновения пожаров.

1.3 Использование космических снимков при учете лесного фонда для целей лесоустройства

Применение аэрокосмической информации для инвентаризации лесов с учетом их многофункциональной ценности как никогда актуально, но нуждается

в дальнейшем развитии методов. Современные ГИС-технологии, включая системы обработки, анализа и представления данных дистанционного зондирования, открывают широкие возможности для получения различных лесных карт-схем, обусловленных практической необходимостью, отражающих различные лесоводственно-таксационные, природно-климатические и иные параметры неоднородности (Лабутина, 2004).

В современную эпоху интенсивного развития и стремительного технического прогресса оценку экологического состояния лесного покрова покрытых лесной растительностью земель и получение лесоводственно-таксационных характеристик лесных насаждений невозможно представить без использования передовых методов дистанционного зондирования. Эти технологии позволяют осуществлять детальные наблюдения за состоянием лесов с помощью различных датчиков, установленных на самолетах, спутниках и беспилотных летательных аппаратах. Анализ полученных данных позволяет оценить такие параметры лесных массивов, как площадь, состав пород, возраст деревьев, состояние здоровья и наличие повреждений.

Математическая обработка данных наземных и спутниковых исследований играет важную роль в выявлении закономерностей динамики лесного покрова и прогнозировании изменений его состояния. Использование статистических методов, нейронных сетей и искусственного интеллекта позволяет строить точные модели, которые могут быть использованы для оценки текущего состояния и прогнозирования будущих изменений в лесных экосистемах.

Методы картографического моделирования на основе ГИС-технологий помогают интегрировать различные пространственные данные, включая результаты дистанционного зондирования и наземных исследований. Это позволяет создавать детальные карты лесов, отображающие различные характеристики лесных массивов, такие как тип леса, возраст деревьев, состояние здоровья и наличие повреждений (Фомин, Залесов, 2013). Такие карты служат ценным инструментом для планирования лесохозяйственной деятельности,

контроля за соблюдением лесного законодательства и предотвращения негативного воздействия на лесные экосистемы.

Кроме того, ГИС предоставляет ряд дополнительных возможностей при классификации, районировании и экстраполяции данных на множественной пространственной основе. Это позволяет проводить более детальный анализ лесных массивов, выявлять закономерности их динамики и прогнозировать изменения в их состоянии (Исаев и др., 2009). Информация, полученная с помощью ГИС, является ценным инструментом для принятия обоснованных решений в сфере лесного хозяйства и охраны окружающей среды.

При оценке состояния лесов одним из важных результатов является создание карты лесной растительности. Эта карта строится на основе характеристик лесной растительности, которые могут быть как отдельными, так и комплексными, и охватывает политико-административные единицы и природно-территориальные комплексы. Полученные при обработке данных цифровой съемки карты лесной растительности являются важным материалом, отражающим информацию о разнообразии лесных территорий, с использованием определенного спектра параметров и индикаторов (Мониторинг биологического разнообразия..., 2008; Исаев и др., 2009).

Карты лесной растительности являются важным инструментом для изучения и мониторинга состояния лесов. Они позволяют определить типы лесной растительности, их распределение и площадь. Кроме того, на основе карты можно провести анализ изменений в лесном покрове со временем.

Для создания карты лесной растительности используются различные источники данных, такие как спутниковые снимки, аэрофотосъемка, данные наземных обследований и географические информационные системы. Эти данные позволяют получить информацию о характеристиках лесной растительности, таких как типы деревьев, плотность древостоя, возраст леса и состояние растительности.

Карты лесной растительности и связанная с ними информация играют важную роль в управлении лесными ресурсами. Они помогают определить места,

где необходимо проводить лесохозяйственные работы, или защищать уязвимые экосистемы. Кроме того, эти карты могут быть использованы для планирования охраны биоразнообразия и предотвращения лесных пожаров.

Важно отметить, что создание карты лесной растительности требует совместных усилий различных организаций и экспертов. Необходимо проводить полевые исследования, собирать и анализировать данные, а затем создавать и обновлять карты с учетом изменений в лесных экосистемах. Такой подход позволяет получить точную и актуальную информацию о состоянии лесов и способствует эффективному управлению лесными ресурсами.

В современном мире состояние лесов и их экосистем является предметом пристального внимания со стороны лесного хозяйства и природоохранных структур. Для эффективной защиты и управления лесными ресурсами необходимо иметь единообразную систему оценки их состояния, масштабов и уровней.

Разработка такой системы индикаторов и критериев оценки является одним из приоритетных направлений деятельности государственных органов, научных учреждений и общественных организаций. Внедрение единой системы оценки позволит обеспечить сопоставимость результатов мониторинга лесов, проводить комплексный анализ их состояния и разрабатывать меры по охране и восстановлению лесных экосистем (Национальный доклад..., 2003; Черненко и др., 2009; Ministerial conference..., 1993; The Montreal process..., 1995; BEAR..., 2001).

В рамках создания системы индикаторов и критериев оценки состояния лесов особое внимание уделяется гармонизации форматов данных и их обработки. Это необходимо для обеспечения возможности обмена информацией между различными организациями и ведомствами, участвующими в мониторинге лесов. Гармонизация форматов данных позволит повысить точность и достоверность сведений о состоянии лесов, а также облегчит процесс их анализа и интерпретации (Национальный доклад..., 2003; Черненко и др., 2009).

Большое значение имеет практическое применение разработанных индикаторов и критериев оценки состояния лесов в практике лесного хозяйства и природоохранной деятельности. Внедрение системы оценки позволит лесохозяйственным организациям и природоохранным структурам более эффективно планировать и осуществлять мероприятия по охране и восстановлению лесов (Национальный доклад..., 2003; Классификатор тематических задач..., 2009; Ministerial conference..., 1993; The Montreal process..., 1995; BEAR..., 2001).

Одним из ключевых направлений развития системы индикаторов и критериев оценки состояния лесов является использование современных технологий. В частности, применение геоинформационных систем (ГИС), дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и других цифровых инструментов позволяет значительно повысить точность и оперативность оценки состояния лесов.

Оценка состояния лесов является важной задачей для обеспечения устойчивого лесопользования и сохранения лесных экосистем. Для решения поставленной задачи применяется методологический подход, в основе которого лежат следующие информационные компоненты: данные цифровой съемки земной поверхности, результаты лесотаксационных работ и полевых исследований, а также базовые картографические материалы. (Аковецкий, 1983; Мониторинг биологического разнообразия..., 2008; Avery, Berlin, 1992).

В дополнение к этим основным информационным составляющим в методологическом подходе к оценке состояния лесов могут использоваться и другие источники данных, такие как статистические данные, литературные источники и публикации в СМИ.

Использование методологического подхода к оценке состояния лесов позволяет получить комплексную информацию о состоянии лесов на больших территориях, что необходимо для принятия обоснованных решений по их охране и управлению.

В последние годы в методологический подход к оценке состояния лесов были внесены некоторые изменения и дополнения. В частности, стали использоваться новые технологии ДЗ, которые позволяют получать более точную и подробную информацию о состоянии лесов. Также были разработаны новые методы лесотаксационных работ и полевых исследований, которые позволяют более эффективно оценивать состояние лесных экосистем.

Кроме того, в методологический подход к оценке состояния лесов были включены новые показатели, такие как биологическое разнообразие, углеродный баланс и устойчивость лесов к изменению климата. Это позволяет более полно оценить состояние лесов и принимать меры по их охране и управлению (Мультифункциональность и биоразнообразие..., 2019).

Таким образом, разработка и внедрение системы индикаторов и критериев оценки состояния лесов имеет большое значение для обеспечения эффективной защиты и управления лесными ресурсами. Гармонизация форматов данных и их обработки, практическое применение системы оценки в лесохозяйственной и природоохранной деятельности, а также использование современных технологий позволяют повысить точность и достоверность информации о состоянии лесов и принимать более обоснованные решения по их охране и восстановлению.

За прошедшие годы на основе использования материалов космической съемки разработаны и апробированы, в том числе и в производственных условиях, различные методики, рекомендации, технологии решения задач лесного хозяйства, связанные с оценкой состояния лесов (Данюлис, 1989; Жири́н, 1997; Сухих, 2001; Харин, 2003; Барталев, 2006; Исаев и др., 2009; Низаметдинов, 2009; Бондур, 2015; Воробьев, 2016; Жири́н, Лукина, 2017; Плотникова, 2019; Стыщенко, 2019; Шарый и др., 2020; Lambin, 1999; Peterson et al., 1999; Hall et al., 2003; Lu et al., 2004; King et al., 2005; Tsutsumi et al., 2005; Chandra, Ghosh, 2006; Batistella et al., 2007; Chen, Zhao, 2007; Wulder et al., 2008; Kajisa et al., 2009; Jing et al., 2009; Hermosilla et al., 2016; Zhao et al., 2018; Breidenbach et al., 2021; Bolyn et al., 2022 и др.). При разработке методик исследуются дешифровочные возможности материалов космической съемки для определения основных групп

категорий земель, а также биометрических параметров деревьев в лесных насаждениях при визуально-инструментальном способе дешифрирования (Сухих, Жирин, 2002, Изображение Земли..., 2005).

Одной из ключевых задач при изучении лесных экосистем является точное определение характеристик лесных насаждений. В настоящее время широко применяются различные методы и техники для достижения этой цели, включая использование аэрофотоснимков и космических снимков разного пространственного разрешения. При этом точность определения характеристик лесных насаждений с использованием аэрофотоснимков и космических снимков в сравнении с таковой при наземных методах обследования лесов существенно отличается. Космические снимки, полученные с помощью спутников дистанционного зондирования Земли, охватывают большие площади и предоставляют информацию о состоянии лесов на обширных территориях. Однако пространственное разрешение космических снимков, как правило, ниже, чем у аэрофотоснимков, что ограничивает их возможности в плане детальной идентификации отдельных деревьев и других мелких объектов на поверхности Земли.

Еще с одной стороны, аэрофотоснимки, сделанные с самолетов или беспилотных летательных аппаратов, обладают более высоким пространственным разрешением, позволяя получать более подробную информацию о лесных насаждениях. Аэрофотоснимки можно использовать для идентификации отдельных деревьев, оценки их высоты, диаметра ствола и других параметров. Однако аэрофотосъемка является более дорогим и трудоемким процессом по сравнению с получением космических снимков.

В практике лесоустройства и лесного хозяйства космические снимки и аэрофотоснимки часто используются в сочетании с картографическими и таксационными данными, выборочными аэрофотоснимками и наземными работами. Такой комплексный подход позволяет повысить точность и достоверность получаемой информации о лесных насаждениях (Сухих, Жирин, 2005).

Наземные методы обследования лесов, такие как таксационные описания, позволяют получить наиболее полную и точную информацию о характеристиках лесных насаждений. Однако наземные работы требуют значительных затрат времени и ресурсов, что ограничивает их применение для обследования больших территорий.

В целом выбор метода обследования лесов зависит от конкретных целей и задач, а также от имеющихся ресурсов. Космические снимки и аэрофотоснимки могут использоваться для получения общей картины состояния лесов на обширных территориях, а наземные методы обследования позволяют получить более подробную и точную информацию для конкретных участков леса.

Космические снимки с разрешением 7–10 м и 20–40 м не позволяют извлечь детальную информацию о лесных насаждениях, необходимую для проведения традиционной лесоинвентаризации. Это связано с тем, что на таких снимках невозможно различить отдельные деревья и получить данные об их лесоводственно-таксационной характеристике, таких как видовой состав, высота, возраст, группа возраста, полнота, запас сухостоя и запас валежной древесины, что указывает на неприменимость указанных данных инвентаризации лесов традиционным способом (Сухих, Жирин, 2005).

Традиционная лесоинвентаризация проводится с использованием наземных методов, таких как закладка пробных площадей и проведение глазомерных измерений. Эти методы позволяют получить точную и детальную информацию о лесном насаждении, но они очень трудоемкие и дорогостоящие.

В последние годы активно развиваются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют получать информацию о лесных насаждениях с помощью спутников, самолетов и беспилотных летательных аппаратов. Космические снимки с высоким пространственным разрешением (менее 1 м) используют для получения подробной информации о каждом дереве, включая его породу, высоту, диаметр и объем. Такие снимки можно использовать для проведения лесоинвентаризации с высокой точностью и при этом значительно сократить затраты.

Однако космические снимки с высоким пространственным разрешением имеют и свои недостатки. Они очень дороги и не всегда доступны. Кроме того, обработка и анализ таких снимков требует специальных знаний и программного обеспечения.

В настоящее время ведутся активные исследования по разработке методов использования космических снимков среднего пространственного разрешения для проведения лесоинвентаризации. Эти методы основаны на использовании текстурных и спектральных характеристик лесных насаждений. Текстуальные характеристики отражают пространственное распределение лесных насаждений, а спектральные характеристики – их видовой состав и состояние (Методические подходы..., 2021).

Использование космических снимков среднего пространственного разрешения для проведения лесоинвентаризации позволит значительно сократить затраты и время проведения работ, а также повысить их точность и объективность.

Одним из перспективных направлений является применение ландшафтно-типологического подхода к проведению лесоинвентаризации. Ландшафтно-типологическая классификация лесов позволяет выделить относительно однородные участки леса с похожими характеристиками рельефа, почв, климата и растительности (Черниковский, 2016). Это позволяет экстраполировать данные о состоянии лесов и параметрах насаждений, полученные на ключевых участках, на всю площадь территории, что значительно повышает эффективность и снижает затраты на лесоинвентаризацию (Алексеев, Черниковский, 2020).

Внедрение современных высокотехнологичных средств анализа и интерпретации данных, таких как ДЗЗ, ГИС и цифровая обработка изображений, позволяет существенно повысить точность и оперативность лесоинвентаризации. С помощью спутниковых снимков и аэрофотоснимков можно получить подробную информацию о состоянии лесов, структуре насаждений, их видовом составе, возрастной структуре и качественных характеристиках. Эта информация может быть использована для оценки запасов древесины, определения

биометрических параметров насаждений и прогнозирования динамики лесных экосистем.

Математический аппарат и программное обеспечение также играют важную роль в проведении лесоинвентаризации (Жириин, Лукина, 2017). С помощью математических моделей и алгоритмов можно анализировать данные, полученные из различных источников (Злобин, Еремеев, 2006), и строить прогнозы о состоянии лесов и их динамике. Программное обеспечение позволяет автоматизировать и ускорить обработку данных, что значительно повышает эффективность и надежность лесоинвентаризации.

1.4 Обзор систем дистанционного зондирования

Одним из главных классификационных признаков систем дистанционного зондирования является наличие/отсутствие возможности воздействия на объект наблюдения. В основе функционирования системы дистанционного зондирования лежит процесс получения данных отражательной способности от объектов, расположенных на земной поверхности. Эти данные могут быть получены с помощью различных методов, среди которых наиболее распространенными являются пассивные методы получения ДЗЗ. Пассивные методы ДЗЗ включают в себя регистрацию естественного излучения, исходящего от объекта диагностики. К пассивным методам получения данных дистанционного зондирования относятся оптические, инфракрасные, рентгеновские, геофизические, акустические и биоэлектрические (Rees, 2001; Chandra, Ghosh., 2006). Активные методы получения ДЗЗ включают в себя генерацию излучения и последующую регистрацию его отраженной или рассеянной части. Активные системы могут, в принципе, использовать любой диапазон электромагнитного излучения. На практике же имеются ограничения из-за условий прозрачности атмосферы (Rees, 2001; Chandra, Ghosh, 2006).

В России дистанционным зондированием из космоса и эксплуатацией предназначенных для этого космических аппаратов и наземных средств приема занимаются различные ведомства:

- Российское космическое агентство (РКА);
- Министерство обороны Российской Федерации (Минобороны России);
- Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр);
- Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

При этом гражданские спутники дистанционного зондирования Земли, используемые для получения данных о состоянии окружающей среды, природных ресурсов и решения различных задач в народном хозяйстве, контролируются Российским космическим агентством.

В настоящее время в России эксплуатируется несколько десятков спутников дистанционного зондирования Земли, которые позволяют получать данные о различных параметрах земной поверхности, атмосферы, океана, а также о геофизических процессах, происходящих на Земле. Эти данные используются для решения широкого круга задач:

- мониторинга состояния окружающей среды, в том числе наблюдения за лесами, сельскохозяйственными угодьями, водными ресурсами, ледниками и т. д.;
- прогнозирования природных и техногенных катастроф, таких как пожары, наводнения, землетрясения, цунами и т. д.;
- картографирования и землеустройства;
- обнаружения и оценки природных ресурсов, таких как нефть, газ, полезные ископаемые и т. д.;
- управления сельским и лесным хозяйством;
- мониторинга состояния атмосферы и океана, в том числе наблюдения за погодой, климатом, загрязнением воздуха и воды и т. д.;
- проведения научных исследований в различных областях знаний.

Данные, полученные с различных космических аппаратов с достаточно высоким пространственным и спектральным разрешением, таких как SPOT, ASTER, QuikBird, IKONOS, Landsat ETM, NOAA и российские «Ресурс-ДК», «Ресурс-Ф» и «Ресурс-О», широко используются для инвентаризации лесов, лесоустроительных работ и оценки состояния зеленых насаждений. Эти спутники предоставляют ценную информацию, которая используется для инвентаризации лесов, оценки состояния лесных ресурсов, обнаружения и мониторинга лесных пожаров, а также прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.

QuikBird и IKONOS являются коммерческими спутниками, которые обеспечивают очень высокое пространственное разрешение. QuikBird имеет разрешение 61 см, а IKONOS – 1 м. Это позволяет получать очень детальные изображения земной поверхности, которые могут быть использованы для различных целей, включая картирование лесов, оценку состояния лесных ресурсов, обнаружение и мониторинг лесных пожаров.

SPOT – это серия французских спутников, которые также обеспечивают высокое пространственное разрешение. SPOT имеет разрешение 10 м, что делает его пригодным для различных лесохозяйственных задач, включая инвентаризацию лесов и оценку состояния лесных ресурсов.

ASTER – это японский спутник, который имеет высокое спектральное разрешение. ASTER имеет 14 спектральных каналов, что позволяет ему фиксировать различные типы лесов и оценивать их состояние. Это делает его пригодным для многих лесохозяйственных задач, включая инвентаризацию лесов и оценку состояния лесных ресурсов.

Landsat ETM – это американский спутник, который имеет умеренное пространственное и спектральное разрешение. Landsat ETM имеет разрешение 30 м и 7 спектральных каналов. Это делает его пригодным для различных лесохозяйственных задач, включая инвентаризацию лесов, оценку состояния лесных ресурсов, обнаружение и мониторинг лесных пожаров.

NOAA – это серия американских спутников, которые предоставляют информацию о погоде и климате. Данные со спутников NOAA могут быть использованы для оценки влияния климатических изменений на леса.

«Ресурс-Ф», «Ресурс-О» и «Ресурс-ДК» – это серия российских спутников, которые предоставляют информацию о состоянии окружающей среды. Данные с этих спутников могут быть использованы для оценки состояния лесов и обнаружения и мониторинга лесных пожаров.

Данные AVHRR с метеорологических спутников серии NOAA являются лидером среди всех данных дистанционного зондирования. Ведь эти данные существуют уже с 1978 г. и до сих пор пользуются огромной популярностью (Справочник потребителя..., 2005). Одно из главных преимуществ данных AVHRR – это их бесплатность, что делает их доступными для широкого круга пользователей. При этом необходимо отметить, что, несмотря на некоторые ограничения, данные AVHRR все равно обладают некоторыми очень важными преимуществами. Во-первых, их пространственное разрешение может быть не очень высоким – всего 1,1 км. Относительно других современных спутников AVHRR имеют более низкое разрешение. Это обстоятельство не мешает им иметь очень высокое радиометрическое разрешение. Это означает, что они могут предоставить очень детальную информацию о состоянии поверхности Земли.

Одним из основных преимуществ данных AVHRR является их высокая периодичность съемок. Спутники делают 15–20 снимков в сутки, что позволяет получать информацию о состоянии поверхности Земли в разные временные интервалы. Это особенно важно для мониторинга изменений в динамике погоды, вегетации и других природных процессов.

Данные AVHRR находят применение во многих областях. Они используются для определения температуры суши и поверхности моря, что помогает в прогнозировании погоды и изучении климатических условий. Кроме того, эти данные активно применяются для выявления пожаров, так как они могут обнаружить тепловые источники на поверхности Земли. Также данные AVHRR позволяют измерять вегетационный индекс, что помогает в анализе состояния

растительности и их оценке. Наконец, эти данные используются для наблюдения облачного, снежного и ледового покровов, что имеет важное значение для прогнозирования погоды и изучения климатических изменений.

Многозональные спутниковые данные, полученные от серии LANDSAT в течение более 30 лет, стали весьма популярными и широко применяются в различных областях (Справочник потребителя..., 2005). Снимки, сделанные с использованием Тематического картографа (ТМ), имеют ряд преимуществ, которые выделяют их среди других данных:

- цифровая форма данных;
- доступ к архивам с данными, накопленными за продолжительный период времени;
- наличие теплового канала;
- большое количество спектральных диапазонов – 7 зон съемки.

Помимо этих преимуществ, данные, полученные со спутника LANDSAT ТМ, имеют и некоторые недостатки, такие как:

- среднее геометрическое разрешение (30 м, а в дальнем ИК – 120 м), хотя в настоящее время уже имеются данные LANDSAT-8 с улучшенным разрешением 15 м в видимом диапазоне и 30 м в инфракрасном диапазоне;
- относительно высокая стоимость данных (хотя на данный момент ситуация улучшилась и существуют различные льготные программы для исследователей и некоммерческих организаций).

В России данные LANDSAT хорошо известны и широко используются в научных исследованиях, мониторинге окружающей среды, управлении природными ресурсами и других областях. Данные LANDSAT ТМ были задействованы в ряде международных проектов и грантов, а также позволили получить значительные результаты в различных сферах, таких как:

- картографирование и изучение структуры растительности;
- мониторинг изменений в землепользовании;
- управление лесным хозяйством;
- оценка ущерба от природных катастроф.

В дополнение к спутникам серии LANDSAT в настоящее время существует множество других спутниковых систем (например, Sentinel-2 и Sentinel-1 от Европейского космического агентства), которые предоставляют многозональные данные с высоким разрешением. Эти данные также широко используются в различных областях, дополняя и расширяя возможности данных LANDSAT TM.

Система съемки SPOT (Справочник потребителя..., 2005; Calches, Tremprat, 1986; <https://www.scanex.ru>) является французской и предлагает ряд преимуществ для потребителей. Главной особенностью данных SPOT является их высокое геометрическое разрешение. При панхроматической съемке оно составляет 5 м, а при многозональной – 20 м. Благодаря этому, снимки SPOT обладают высокой детализацией и позволяют получать качественные изображения.

Однако геометрическое разрешение – не единственное преимущество системы SPOT. Компания также предоставляет возможность получения стереопар, что позволяет создавать трехмерные модели местности и проводить более точные анализы. Это особенно полезно для таких отраслей, как картография, геология и градостроительство.

Нельзя не отметить, что снимки SPOT являются одними из самых популярных в мире. Это объясняется не только высоким качеством данных, но и профессионализмом персонала компании SPOT Image. Компания сотрудничает с широкой сетью дистрибьюторов, что обеспечивает доступность и удобство приобретения снимков SPOT.

Важно отметить, что данные SPOT имеют широкий спектр применений. Они используются для мониторинга изменений в окружающей среде, обнаружения и прогнозирования природных катастроф, планирования городского развития и многого другого. Благодаря своей точности и надежности снимки SPOT являются незаменимым инструментом для многих отраслей и организаций.

IRS (Индийская система дистанционного зондирования) – это одна из ведущих систем дистанционного зондирования, получившая признание и востребованность во всем мире. Однако, несмотря на свою известность и узнаваемость, в России она используется относительно мало. Вместе с тем эта

система представляет собой ценный источник цифровых данных, которые могут быть использованы в различных сферах деятельности.

Система IRS включает в себя спутники последнего поколения, такие как IRS-1C и IRS-1D, которые обладают высоким разрешением съемки. Благодаря этому они способны предоставлять детальные изображения объектов на земной поверхности. Панхроматические снимки с геометрическим разрешением 5–6 м могут быть получены с помощью сенсоров на этих спутниках, а в многозональном режиме разрешение составляет 23 м.

Каталоги данных IRS аналогично каталогам SPOT, Landsat или «Ресурс-О» доступны в сети Интернет. Это означает, что исследователи и специалисты в области геопространственных данных могут получить доступ к этим ценным источникам информации, чтобы использовать их в своих проектах и исследованиях.

Индийская система дистанционного зондирования IRS предлагает разнообразные возможности для изучения Земли и ее ресурсов. Благодаря высокому разрешению снимков ученые и специалисты могут анализировать изменения в ландшафте, мониторить состояние лесов, изучать изменения в использовании земли и многое другое.

Кроме того, доступность каталогов данных IRS через Интернет облегчает процесс получения информации. Исследователи могут просматривать и выбирать необходимые снимки, избегая сложностей, связанных с традиционными методами заказа и получения данных. Это существенно ускоряет и упрощает процесс работы с геопространственными данными, что позволяет более эффективно использовать их в научных и прикладных исследованиях.

С 2005 г. стали доступны данные дистанционного зондирования со спутника ORBVIEW-3, который стал третьим космическим аппаратом высокого разрешения коммерческого назначения после IKONOS и QUICKBIRD. Пространственное разрешение снимков, передаваемых со спутника, составляет в спектрзональном режиме 4 м и панхроматическом режиме – 1 м (Справочник потребителя..., 2005).

Данные, полученные при использовании канадского спутника RADARSAT или европейского ERS, используются в России значительно реже по сравнению с данными со спутников оптического диапазона. Вместе с тем использование радиолокационных данных в профессиональных программных продуктах, таких как ERDAS Imagine с дополнительными модулями расширения Radar Mapping System, открыло новые возможности для получения детальной информации о поверхности Земли. Одним из таких инновационных методов является геометрическое трансформирование радарных данных с учетом специфической геометрии радиолокационной съемки. Этот процесс позволяет точнее оценивать геометрические параметры поверхности и получать более детальную информацию.

Другим важным аспектом является построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) с использованием стереопар радиолокационных изображений. Благодаря этому методу мы можем создавать трехмерные модели местности, что позволяет более точно анализировать территории и изучать особенности их рельефа. Это способствует корректному совмещению радиолокационных данных с данными из других источников, например, с оптическими изображениями, получению точной информации о рельефе местности.

Радиолокационные данные также могут быть использованы для изучения различных природных явлений, таких как наводнения, пожары или извержения вулканов. Эти данные позволяют получать информацию о состоянии земной поверхности в любое время суток и при любых погодных условиях, что делает их незаменимыми для оперативного мониторинга окружающей среды.

Российский спутник КОМЕТА зарекомендовал себя на международном уровне благодаря своей выдающейся способности предоставлять высокодетализированные изображения земной поверхности (<http://ruscosmos.narod.ru/KA/kometa/kom.htm>). Фотографические снимки, полученные с использованием камер КВР-1000, отличаются впечатляющим разрешением в 2 м, что позволяет различать даже мельчайшие объекты на Земле.

Наряду с использованием камеры КВР-1000, спутник КОМЕТА оборудован специализированной топографической камерой ТК-350, которая предназначена для получения стереоснимков и обновления топографических карт. Снимки, сделанные с помощью ТК-350, обладают разрешением 10 м, что гарантирует высокую точность и детализацию при обновлении карты местности. Такое разрешение позволяет получать информацию с большой четкостью, охватывая даже мелкие детали ландшафта. Кроме того, ТК-350 способна создавать стереоснимки, что значительно облегчает создание трехмерной модели местности. Это оказывается очень полезным при планировании и анализе различных проектов, таких как строительство дорог, государственные инфраструктурные работы и оценка рисков природных и техногенных объектов. В совокупности с другими средствами космической картографии, такими как радар и многозональные камеры, спутник КОМЕТА является безусловным лидером в обновлении топографических карт местности. С его помощью можно не только улучшить точность существующих карт, но и открыть новые возможности для проведения научных исследований и планирования хозяйственной деятельности.

Отличительной особенностью спутников КОМЕТА является короткий срок их эксплуатации – около одного месяца. Это связано с тем, что КОМЕТА – спутник недолговременного действия, предназначенный для обеспечения регулярного обновления данных о земной поверхности. Такой подход позволяет постоянно получать актуальную информацию о различных регионах Земли и отслеживать изменения, происходящие на местности.

Несмотря на свой относительно короткий срок службы, спутники КОМЕТА вносят значительный вклад в развитие картографии, землеустройства и других областей, где требуются высокоточные данные о земной поверхности. Они позволяют создавать детальные карты, следить за изменениями ландшафта и выявлять различные признаки активности на поверхности Земли. Анализ данных архива свидетельствует о том, что область съемки охватывает в основном зарубежную территорию (<http://ruscosmos.narod.ru/KA/kometa/kom.htm>).

Широкое применение среди российских пользователей имеют снимки со спутников линейки «Ресурс-Ф». Эти спутники оборудованы цифровыми и аналоговыми космическими камерами, что позволяет получать высококачественные фотоснимки поверхности Земли. Данные, полученные со спутников «Ресурс-Ф», применяются в самых разных отраслях, включая картографию, геологию, земледелие, лесоводство, а также мониторинг окружающей среды и анализ последствий стихийных бедствий.

В основном космические снимки со спутников «Ресурс-Ф» доступны из архива до 1994 г. Однако в ноябре-декабре 1997 г. были проведены съемки отдельных территорий России с помощью спутников этой серии.

В дополнение к данным со спутников «Ресурс-Ф» также используются данные с других спутников, таких как «Метеор-ЗМ», «Канада-43» и «Монитор-Э». Снимки со спутников этих серий могут иметь различное разрешение, время съемки и спектральные диапазоны, что позволяет решать широкий спектр задач.

Также в последнее время стала популярна технология получения космических снимков со спутников Planet Labs. Спутниковая группировка Planet Labs состоит из сотен небольших спутников, которые ежедневно проводят съемку всей поверхности Земли. Разрешение снимков со спутников Planet Labs составляет около 3 м на пиксель, что позволяет различать небольшие объекты на поверхности Земли.

Кроме того, компания Maxar Technologies также предоставляет космические снимки с разрешением до 30 см на пиксель. Такое высокое разрешение позволяет различать мельчайшие детали, что делает эти снимки незаменимыми для использования в таких областях, как картография, градостроительство и др.

Данные, полученные со спутников «Ресурс-О» (сканеры МСУ-Э и МСУ-СК), пользуются огромным спросом в России (Евдокимов, Кочергин, 2007). Это обусловлено тем, что в стране широко распространены региональные станции приема этих данных (Селиванов и др., 1988; Кочергин, 2007). Цифровые данные со спутников «Ресурс-О» доступны в оперативном режиме.

Спутниковая группировка «Ресурс-О» состоит из трех аппаратов, которые находятся на различных орбитах. Это позволяет им охватывать практически всю территорию России, включая труднодоступные районы Сибири и Дальнего Востока. Спутники «Ресурс-О» оснащены современным оборудованием, которое позволяет получать высококачественные снимки Земли в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах.

Спутники «Ресурс-О» играют важную роль в развитии российской экономики. Они помогают повышать эффективность использования природных ресурсов, развивать сельское хозяйство и транспорт. Данные со спутников «Ресурс-О» используются для создания новых карт и планов, что способствует развитию градостроительства и других отраслей экономики.

В таблице 1.1 приведены виды и параметры космических съемочных систем, которые рекомендуется использовать для оценки состояния зеленых насаждений.

Таблица 1.1 – Характеристики космических съемочных систем и их сенсоров, используемых для оценки состояния зеленых насаждений

№ п/п	Вид использования	Вид спутника	Датчик	Сезонность съемки	Технические данные	Пространственное разрешение или масштаб
1	Зонирование территории по степени воздействия источников теплового излучения	NOAA	AVHRR	Весна, осень	Тепловая	1 км
		Landsat	ETM+, TIR	То же	То же	60 м
2	Составление обзорных карт типов лесного покрова и условий их произрастания	Landsat	ETM+	Весна, осень	Мультиспектральная	1:100 000 1:200 000
3	Инвентаризация, экологическая оценка состояния лесов, лесоустройство	QuikBird, IKONOS, SPOT, Ресурс-ДК КФС	Сканерные системы	Лето	Мультиспектральная	2,44 м 1–4 м
			МК-4, КФА-1000	То же	Многозональная фотосъемка	5–10 м 1–3 м 1:250 000

Принятая и действующая лесоустроительная инструкция предусматривает порядок проведения работ по лесоустройству лесных насаждений как на землях лесного фонда, так и лесных насаждений, расположенных на землях иных категорий и предусматривает использование данных дистанционного зондирования при производстве работ при определении границ лесотаксационных выделов, установлении таксационной характеристики древостоев и решении широкого круга задач, особенно при устройстве малоосвоенных лесов северных и восточных регионов России.

За последние десятилетия существенно возросли технические возможности съемочной аппаратуры, применяемой при дистанционном зондировании Земли (таблица 1.2). С появлением цифровых камер высокого разрешения и гиперспектрального сканирования картографирование леса стало еще более детальным и точным. Теперь стало возможным не только определять общие характеристики лесов, такие как площадь и объем древесины, но и получать подробную информацию о состоянии отдельных деревьев.

Таблица 1.2 – Основные характеристики сенсоров спутников

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространствен ное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
PAN	IRS-1C/1D	от 0.5 до 0.75 соответствует зеленому цвету и БИК	5.8	70	1 / 5 дн.
LISS-3		от 0.52 до 0.59 соответствует зеленому цвету, от 0.62 до 0.68 соответствует красному цвету, от 0.77 до 0.86 относится к БИК	23	140	1 / 24–25 дн.
LISS-4 / Mono	IRS-P6	от 0.62 до 0.68 – соответствует красному цвету	5.8	70	1 / 5 дн.

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространстве нное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
LISS-4 / MX	IRS-P6	от 0.52 до 0.59 - соответствует зеленому цвету от 0.62 до 0.68 – соответствует красному цвету от 0.77 до 0.86 – относится к БИК	5.8	23	1 / 5 дн.
LISS-3	IRS-P6	от 0.52 до 0.59 соответствует зеленому цвету, от 0.62 до 0.68 соответствует красному цвету, от 0.77 до 0.86 относится к БИК, от 1.55 до 1.70 относится к среднему ИК	23	140	1 / 24 дн.
AWiFS		от 0.52 до 0.59 соответствует зеленому цвету, от 0.62 до 0.68 соответствует красному цвету, от 0.77 до 0.86 относится к БИК, от 1.55 до 1.70 относится к среднему ИК	55	740	1 / 5 дн.
PAN-Fore	IRS-P5	от 0.50 до 0.85 соответствует зеленому цвету и БИК	2.5	29	1 / 5 дн.
PAN-Aft				26	1 / 5 дн.
HRV PAN	SPOT 2	от 0.50 до 0.73 соответствует зеленому цвету и БИК	10	60	1 / 1–4 дн.
HRV XS		от 0.52 до 0.59 соответствует зеленому цвету, от 0.62 до 0.68 соответствует красному цвету, от 0.77 до 0.86 относится к БИК	20	60	1 / 1–4 дн.

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространстве нное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
HRVIR MONO	SPOT 4	от 0.61 до 0.68 соответствует красному цвету	10	60	1 / 1–4 дн.
HRVIR XS	SPOT 4	от 0.50 до 0.59 соответствует зеленому цвету, от 0.61 до 0.68 соответствует красному цвету, от 0.78 до 0.89 относится к БИК, от 1.58 до 1.75 относится к среднему ИК	20	60	1 / 1–4 дн.
HRG PAN	SPOT 5	от 0.48 до 0.71 соответствует зеленому цвету и БИК	2.5 или 5	60	1 / 1–4 дн.
HRG XS		от 0.50 до 0.59 соответствует зеленому цвету, от 0.61 до 0.68 соответствует красному цвету, от 0.78 до 0.89 относится к БИК, от 1.58 до 1.75 относится к среднему ИК	10 10 10 20	60	1 / 1–4 дн.
ETM+	Landsat 7	от 0.450 до 0.515 соответствует синему цвету, от 0.525 до 0.605 соответствует зеленому цвету, от 0.630 до 0.690 соответствует красному цвету, от 0.750 до 0.900 относится к БИК, от 1.550 до 1.750 относится к среднему ИК, от 10.40 до 12.50 относится к тепловому,	30 30 30 30 60	185	1 / 3–4 дн.

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространстве нное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
		от 2.090 до 2.350 относится к среднему ИК, от 0.520 до 0.900 соответствует зеленому цвету и БИК	30 15		
TM	Landsat 5	от 0.450 до 0.515 соответствует синему цвету,	30	185	1 / 16 дн.
		от 0.525 до 0.605 соответствует зеленому цвету,	30		
		от 0.630 до 0.690 соответствует красному цвету,	30		
		от 0.750 до 0.900 относится к БИК,	30		
		от 1.550 до 1.750 относится к среднему ИК, от 10.40 до 12.50 соответствует тепловому,	120		
от 2.090 до 2.350 (средний ИК)	30				
PAN	EROS A	от 0.5 до 0.9 соответствует зеленому цвету и БИК	2.0	13.5	1 / 3–4 дн.
PAN	EROS B	от 0.5 до 0.9 соответствует зеленому цвету и БИК	0.7	7	1 / 3–4 дн.
Panchromatic	Ikonos	от 0.45 до 0.9 соответствует синему цвету и БИК	0.82	от 11.3 (в надире) до 13.8 (при откл. от надире на 26 град.)	1 / 3–4 дн.
Multispectral		от 0.45 до 0.52 соответствует синему цвету, от 0.51 до 0.60 соответствует зеленому цвету,	3.2		

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространстве нное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
		от 0.63 до 0.70 соответствует красному цвету, от 0.76 до 0.85 относится к БИК			
Panchromatic	QuickBird	от 0.45 - 0.9 соответствует синему цвету и БИК	0.61 - 0.72	от 16.5 (в надире) до 20.8 (при откл. от надира на 25 град.)	1 / 3–4 дн.
Multispectral		от 0.45 до 0.52 соответствует синему цвету, от 0.52 до 0.60 соответствует зеленому цвету, 0.63 до 0.69 соответствует красному цвету, 0.76 до 0.9 относится к БИК	2.44 - 2.88		
SAR / Fine	Radarsat - 1	С-диапазон, 5.6 см	6	50	от 1 / 1 дн. до 1 / 6 дн.
SAR / Standart			12	100	
SAR / Wide			12	150	
SAR / Extended Low			12	170	
SAR / Extended High			12	75	
SAR / ScanSAR Narrow			25	300	
SAR / ScanSAR Wide			50	450 - 500	
Image Mode	Envisat-1	С-диапазон, 5.6 см	30	от 56 до 100	1 / 1–3 дн.
Alternating Polarisation Mode			30	от 56 до 100	
Wide Swath Mode			150	400	
SpotLight	TerraSAR- X	Х-диапазон, 3 см	1	10 x 5	1 / 1–3 дн.
StripMap			3	30 x 50	
ScanSAR			16	100 x 150	

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространстве нное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
MODIS	Terra Aqua	от 0.620 до 0.670 соответствует красному цвету, от 0.841 до 0.876 относится к БИК, от 0.459 до 0.479 соответствует синему цвету, от 0.545 до 0.565 соответствует зеленому цвету, от 1.230 до 1.250 относится к БИК, от 1.628 до 1.652 относится к среднему ИК, от 2.105 до 2.155 относится к среднему ИК, от 0.405 до 0.420 соответствует фиолетовому цвету, от 0.438 до 0.448 соответствует фиолетовому цвету, от 0.483 до 0.493 соответствует синему цвету, от 0.526 до 0.536 соответствует голубому цвету, от 0.546 до 0.556 - соответствует зеленому цвету, от 0.662 до 0.672 соответствует красному цвету, от 0.673 до 0.683 соответствует красному цвету, от 0.743 до 0.753 относится к БИК, от 0.862 до 0.877 относится к БИК,	250 500 1000	2 300	1–2 раза в сутки

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространстве нное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
MODIS	Terra Aqua	0.890 до 0.920 относится к БИК, от 0.931 до 0.941 относится к БИК, от 0.915 до 0.965 относится к БИК, от 3.660 до 3.840 соответствует тепловому, от 3.929 до 3.989 соответствует тепловому, от 3.929 до 3.989 соответствует тепловому, от 4.020 до 4.080 соответствует тепловому, от 4.433 до 4.498 соответствует тепловому, от 4.482 до 4.549 соответствует тепловому,	500	2 300	1–2 раза в сутки
		от 1.360 до 1.390 относится к БИК, от 6.535 до 6.895 соответствует тепловому, от 7.175 до 7.475 соответствует тепловому, от 8.400 до 8.700 соответствует тепловому, от 9.580 до 9.880 соответствует тепловому, от 10.780 до 11.280 соответствует тепловому, от 11.770 до 12.270 соответствует тепловому,	1000		

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространствен ное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
MODIS	Terra Aqua	от 13.185 до 13.485 соответствует тепловому, от 13.485 до 13.785 соответствует тепловому, от 13.785 до 14.085 соответствует тепловому, от 14.085 до 14.385 соответствует тепловому	1000	2 300	1–2 раза в сутки
ASTER / VNIR	Terra	от 0.52 до 0.60 соответствует зеленому цвету, от 0.63 до 0.69 соответствует красному цвету, от 0.76 до 0.86 относится к БИК, надирный от 0.76 до 0.86 относится к БИК обратный	15	60	1 / 14–16 дн.
ASTER / SWIR		от 1.600 до 1.700 относится к среднему ИК от 2.145 до 2.185 относится к среднему ИК от 2.185 до 2.225 относится к среднему ИК от 2.235 до 2.285 относится к среднему ИК от 2.295 до 2.365 относится к среднему ИК от 2.360 до 2.430 относится к среднему ИК	30	60	1 / 4–16 дн.

Прибор/ режим съемки	Спутник	Спектральный диапазон	Пространстве нное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
ASTER / TIR	Terra	от 8.125 до 8.475 соответствует тепловому, от 8.475 до 8.825 соответствует тепловому, от 8.925 до 9.275 соответствует тепловому, от 10.25 до 10.95 соответствует тепловому, от 10.95 до 11.65 соответствует тепловому	90	60	1 / 4 –16 дн.
МСУ-Э	Метеор- 3М	от 0.50 до 0.590 соответствует зеленому цвету, от 0.61 до 0.690 соответствует красному цвету, от 0.81 до 0.900 относится к БИК	50	76	1 / 5 дн.
МСУ-Э		от 0.50 до 0.590 соответствует зеленому цвету, от 0.61 до 0.690 соответствует красному цвету, от 0.81 до 0.900 относится к БИК	35	45	1 / 6 дн.
МСУ-СК	Ресурс-О	от 0,54 до 0,60 соответствует зеленому цвету, от 0,60 до 0,72 соответствует красному цвету, от 0,72 до 0,82 относится к БИК, от 0,81 до 1,00 относится к БИК, от 10,30 до 11,75 соответствует тепловому	140	600	1 / 5 дн.

Данные спутниковых снимков используются не только для инвентаризации и мониторинга лесов, но и для организации лесоустройства и планирования лесохозяйственных мероприятий. Цифровые карты и данные спутниковой съемки позволяют определить наиболее продуктивные участки леса, нуждающиеся в защите и уходе, а также выделить территории, наиболее подверженные пожарам и другим природным катаклизмам.

Одним из основных преимуществ использования спутниковых данных для лесного хозяйства является возможность получения объективной и оперативной информации. Спутниковые снимки позволяют получить полный обзор территории независимо от погодных условий и труднодоступности районов. Кроме того, данные спутниковой съемки могут использоваться для отслеживания изменений в лесах во времени, что позволяет своевременно реагировать на изменения и принимать необходимые меры.

В последние годы наблюдается существенное снижение цен на рынке космических снимков (таблица 1.3 по данным ООО ИТЦ «СканЭкс»). Это связано с появлением новых спутников и технологий, что позволяет получать снимки высокого разрешения по доступной цене. Кроме того, все больше компаний предоставляют пользователям доступ к снимкам с нескольких спутников, что повышает качество и точность информации.

Таблица 1.3 – Стоимость сцены на начало 2024 г.

Источники информации ДЗЗ/ космический аппарат	Минимальный объем поставки	Размер сцены, км	Стоимость, у.е.
EROS-A1 (2 м)	1 сцена	~ 13.5 x 13.5	910
	1 сцена	~ 13.5 x 13.5	1 500
Landsat-5 (30 м)	Сцена	185 x 185	390
SPOT-2/4 (10 или 20 м)	Сцена	60 x 60	1 900
	1/2 сцены	30 x 60	1 120
	1/4 сцены	30 x 30	620

Источники информации ДЗЗ/ космический аппарат	Минимальный объем поставки	Размер сцены, км	Стоимость, у.е.
IRS-P6 LISS-4 Mono (5,8 м)	Сцена	70 x 70	1970
	2/3 сцены	46 x 70	1640
	4/9 сцены	46 x 46	1140
	1/3 сцены	23 x 70	870
	2/9 сцены	23 x 46	620
	1/9 сцены	23 x 23	390
IRS-P6 LISS-4 MSS (5,8 м)	Сцена	23 x 23	1970
	1/2 сцены	23 x 11.5	1160
	1/4 сцены	11.5 x 11.5	640
IRS-P6 LISS-3 (24 м)	Сцена	140 x 140	1970
	1/2 сцены	70 x 140	1160
	1/4 сцены	70 x 70	640
IRS-P6 AWiFS (57 м)	Сцена	740 x 740	1970
	1/2 сцены	370 x 740	1160
	1/4 сцены	370 x 370	640
IRS-1C/1D PAN	Сцена	70 x 70	1270
IRS-1C/1D LISS-III	Сцена	142x142	510
Ресурс-О1 №3,4 МСУ-Э	Сцена	100 км ²	1,2
Метеор - 3М МСУ-Э	Сцена	100 км ²	2,2
Ресурс-О1 №3,4 Океан-О №1 МСУ-СК	Сцена	100 км ²	0,08

Одним из основных преимуществ космических снимков является отсутствие грифа секретности. Это означает, что снимки могут быть использованы для любых целей, включая коммерческие и научные исследования, в отличие от аэроснимков, которые часто имеют гриф секретности и не могут быть использованы без специального разрешения.

В настоящее время космические снимки широко используются в различных областях, включая лесоустройство. Они позволяют получить подробную информацию о лесных массивах, включая площадь, плотность и состав древостоя.

Использование космических снимков в лесоустройстве имеет ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет получать информацию о лесных

массивах с большой площадью и в труднодоступных местах. Во-вторых, снимки могут быть получены в любое время суток и при любых погодных условиях. В-третьих, космические снимки позволяют получить более точную и объективную информацию о лесах, чем аэроснимки.

Однако следует отметить, что космические снимки имеют и некоторые недостатки. Во-первых, они могут быть дорогостоящими. Во-вторых, разрешение космических снимков может быть недостаточным для некоторых целей. В-третьих, обработка космических снимков требует специальных знаний и программного обеспечения.

Несмотря на эти недостатки, космические снимки являются ценным инструментом для лесоустройства. Они позволяют получить объективную и точную информацию о лесных массивах, что помогает принимать обоснованные решения по управлению лесами и их эксплуатации.

1.5 Технологии и методики обработки современных космических снимков

Спутниковые данные высокого разрешения, такие как QuickBird, Ikonos и Orbview-3, стали доступной альтернативой аэрофотоснимкам для создания картографических продуктов. Эти спутники обеспечивают разрешение от 1 до 0,61 м в панхроматическом режиме и от 4 до 2,44 м в мультиспектральных режимах, что позволяет производить картографические продукты, сопоставимые с традиционными материалами обработки включая ортотрансформирование даже в масштабе 1:10 000.

Ортотрансформирование изображений является важным процессом при создании картографических продуктов (Егошкин, Кочергин, 2005; Кочергин, 2007), поскольку оно устраняет искажения, вызванные рельефом, условиями съемки и типом камеры. Это достигается путем преобразования изображения в ортогональную проекцию, что позволяет точно привязать объекты на изображении к реальной местности.

В дополнение к спутниковым данным высокого разрешения существуют также другие источники данных, которые могут использоваться для создания картографических продуктов. К ним относятся лазерное сканирование, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и наземные мобильные системы сканирования. Каждый из этих источников данных имеет свои собственные преимущества и недостатки, и выбор конкретного источника зависит от конкретных требований проекта.

Картографические продукты, созданные на основе спутниковых данных высокого разрешения, используются для широкого спектра приложений, включая планирование землепользования, управление водными ресурсами, лесное хозяйство и обеспечение безопасности. Эти продукты также используются для создания трехмерных моделей местности, которые могут применяться для визуализации и анализа ландшафта.

В целом растущая доступность спутниковых данных высокого разрешения и других источников данных привела к значительному улучшению качества и точности картографических продуктов. Эти продукты используются для широкого спектра приложений и играют важную роль в принятии решений на всех уровнях: от местного до глобального.

Ключевой проблемой для нанесения на карту информации является геометрическая обработка спутниковых данных, которая представляет собой важный этап при использовании данных дистанционного зондирования Земли для картографирования и других целей. Данная обработка является обязательной, если требуется получить точные и достоверные результаты. Процесс геометрической обработки включает в себя исправление искажений, вызванных вращением и движением спутника, а также другими факторами. Существуют различные методы геометрической обработки, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки (Гонсалес, Вудс, 2006; Катаманов, 2009).

Среди основных поставщиков спутниковых данных для картографирования можно выделить компании Space Imaging и DigitalGlobe. Эти компании обладают

значительными возможностями относительно предоставления пользователям данных с полной геометрической обработкой. Space Imaging является оператором, который управляет спутником Ikonos. Данный спутник не имеет возможности выполнять полную геометрическую обработку спутниковых данных, поэтому для этого используются обобщенные аппроксимирующие функции (рациональные полиномы) – метод RPC. Компания Space Imaging применяет этот метод для создания производных продуктов, но использование строгой модели недоступно для широкого круга пользователей. Модель RPC использует коэффициенты кубических многочленов для того, чтобы перейти от координат земной поверхности (широта, долгота, высота) к координатам изображения (линия, колонка) для конкретного обрабатываемого изображения. Изображения высокого разрешения, получаемые со спутников IKONOS и QuickBird, снабжаются номинальными (приблизительными) геопривязками, вычисленными по исходному положению спутника на орбите и геометрии изображения (Feng et al., 2006). В процессе геопривязки модель рационального многочлена может быть полезна для оценки остаточных погрешностей определения положения наземных опознавательных знаков.

Ортотрансформирование изображения можно провести с номинальной геопривязкой, используя метод RPC, но более точный результат можно получить, выполнив сначала повторную геопривязку изображения по точным равномерно распределенным трехмерным наземным опознавательным знакам, например полученным при помощи GPS-приемника. Опознавательные знаки используются для корректировки значений коэффициентов RPC – модели, чтобы уточнить положение каждого элемента изображения. Такая корректировка обеспечивает получение более точного соответствия между изображением и цифровой моделью рельефа (ЦМР), гарантируя, что в процессе ортотрансформирования для каждого элемента изображения будет использовано правильное высотное значение.

При этом необходимо отметить, что ортотрансформирование является самым правильным способом обработки данных для цифрового

трансформирования. Этот метод требует перестройки геометрии датчика в момент регистрации для каждой строки цифровой космической съемки. В классической фотограмметрии применяется прием получения цифровой модели местности (ЦММ) путем обработки стереопар изображений. Однако в некоторых случаях можно использовать ранее созданные цифровые модели местности, если их качество соответствует масштабу конечного продукта. Также для улучшения точности и надежности обработки данных можно воспользоваться созданными ранее цифровыми моделями местности в сочетании с наземными точками геопривязки (Ground Control Points – GCP) для дополнительного повышения точности и надежности обработки данных.

Последним этапом обработки данных спутниковых сцен обычно является обработка единичных сцен, так как не все спутниковые датчики предназначены для получения стереопар. Для трансформации изображения с целью уменьшения шума и повышения качества применяются специальные методы, основывающиеся на модели датчика. Модель датчика может быть физической или типовой. Физические модели строгие и требуют знания параметров конкретного датчика, для которого они были разработаны, при этом каждый параметр имеет физическое значение. Типовые модели датчика, в свою очередь, не зависят от конкретного датчика и используют обобщенную информацию о нем, не требуя точных физических данных о параметрах процесса получения изображения (Feng et al., 2006).

Строгая модель позволяет получить точное трехмерное описание объекта и выполнить ортотрансформирование изображений. Однако типовая модель датчика предоставляет только математические отношения между трехмерными координатами объекта и соответствующими координатами изображения. Чтобы улучшить эту модель, можно использовать обобщенные аппроксимирующие функции, такие как рациональные полиномы. Рациональные полиномы выражают отношения между объектом и координатами изображения через коэффициенты многочленов, которые называются коэффициентами рационального многочлена

(RPC). Использование таких аппроксимирующих функций позволяет улучшить точность моделирования объектов и повысить качество ортотрансформирования изображений. При этом объемный текст будет более полным и позволит получить более точные результаты для анализа и визуализации объектов, особенно в трехмерном пространстве (Прэтт, 1982). При использовании типовой модели результаты ортотрансформирования зависят от точек геопривязки, определенных на изображении и измеренных по картам (Mostafavi, Smith, 1978). При выборе метода обработки данных важно учитывать несколько ключевых факторов.

Во-первых, желаемая точность результата имеет огромное значение. Есть методы, которые обеспечивают высокую точность, но требуют больших вычислительных ресурсов и времени для обработки. Другие методы могут быть менее точными, но при этом более эффективными с точки зрения ресурсов. Выбор зависит от конкретной задачи и потребностей.

Во-вторых, доступное программное обеспечение также влияет на выбор метода обработки. Некоторые методы могут быть реализованы с помощью различных программных инструментов, в то время как другие требуют специализированного ПО.

Также морфология и размеры обрабатываемой области играют роль при выборе метода обработки. Некоторые методы лучше справляются с определенными типами данных или структурами, поэтому необходимо учитывать особенности нашей области интереса. Кроме того, объем данных также может быть важным фактором, поскольку некоторые методы могут быть более эффективными при работе с большими объемами информации, в то время как другие – при обработке менее объемных данных.

Наконец, качество доступных вспомогательных данных может повлиять на выбор метода обработки. Некоторые методы требуют высококачественных данных для достижения оптимальных результатов. Если у нас есть доступ к надежным и качественным данным, это может определить выбор метода.

В итоге выбор метода обработки данных – это комплексный процесс, который требует внимательного анализа и учета всех вышеперечисленных факторов. Он должен быть основан на наших потребностях, ресурсах и желаемых результатах обработки.

Помимо компаний Space Imaging и DigitalGlobe, существует ряд других поставщиков спутниковых данных, которые также предлагают различные уровни геометрической обработки. Среди них можно выделить компании Airbus Defence and Space, Maxar Technologies, Planet Labs и др. Каждая из этих компаний обладает своими уникальными возможностями и технологиями, позволяющими предоставлять пользователям данные с различными характеристиками.

1.6 Классификация изображений

Под классификацией изображения понимается процесс количественного отбора пикселей или части изображения и их группировки в специальные классы, которые предназначены для представления различных физических объектов и типов (Rees, 2001). Одним из возможных результатов такого процесса являются тематические карты, картосхемы санитарного состояния лесных насаждений, возрастной структуры и т. д. Для осуществления классификации изображения применяются основные технологии, которые используют радиометрические данные, т. е. значения пикселей изображения. Эти данные играют важную роль в определении принадлежности каждого пикселя к определенному классу, помогая создать точные и надежные классификационные результаты.

Классификация мультиспектральных изображений может производиться в двух основных направлениях. Первое направление – это управляемая классификация. Второе направление – это неуправляемая классификация. Управляемая классификация основана на использовании информации о необходимых классах. С помощью этой методики определяется диапазон значений пикселей, относящихся к каждому классу. Каждый пиксель изображения проверяется на соответствие определенному классу в согласно

установленным правилам. Процесс классификации регулируется классификатором, который определяет, к какому классу принадлежит каждый пиксель (Rees, 2001).

При проведении классификации изображения осуществляется сравнение значения каждого пикселя с заранее определенными значениями, которые принадлежат различным классам. Затем каждому пикселю присваивается соответствующий класс в зависимости от результата сравнения. Однако для более сложных алгоритмов классификации изображения применяется дискриминантная функция, которая определяет, какой класс будет назначен пикселю.

Для эффективного распределения пикселей изображения по классам используются различные методы. Выбор конкретного классифицирующего правила зависит от типа данных оригинального снимка и задачи, которую необходимо решить. Разработка эффективных алгоритмов классификации позволяет более точно и автоматически определять объекты, паттерны или другие характеристики на изображении, что имеет важное значение в различных областях.

Методы классификации делятся на два основных типа: параметрические и непараметрические. Параметрические методы предполагают наличие известного закона распределения векторных данных, полученных на этапе обучения, для каждого класса и каждого спектрального диапазона. Это означает, что предполагается, что данные подчиняются определенным статистическим закономерностям. Непараметрические методы, в свою очередь, не базируются на подобных предположениях и не требуют знания законов распределения данных.

Далее рассмотрим несколько различных алгоритмов классификации, охватывающих оба типа методов.

Алгоритм классификации на основе определения наименьшего расстояния представляет собой один из самых простых и широко применяемых методов. В его основе лежит идея использования средних векторов, полученных на этапе обучения, для каждого класса классифицируемых объектов и каждого спектрального диапазона в качестве входных данных.

Суть алгоритма заключается в том, что для каждого нового объекта, который требуется классифицировать, вычисляется его эвклидово расстояние до среднего вектора каждого класса и каждого спектрального диапазона. Затем выбирается класс и диапазон, для которых расстояние до объекта оказывается наименьшим. Таким образом, объект относится к этому классу и диапазону. Интересно отметить, что точность классификации, получаемая с использованием данного метода, сопоставима с точностью, достигаемой с помощью более сложных вычислительных алгоритмов, включая алгоритм максимального правдоподобия (Chandra, Ghosh, 2006).

Этот алгоритм широко используется в различных областях, включая распознавание образов, компьютерное зрение, обработку сигналов и др. Его простота и эффективность позволяют успешно решать задачи классификации, особенно в случаях, когда требуется высокая скорость работы или нет достаточного количества данных для применения более сложных алгоритмов.

Несмотря на свою простоту, алгоритм классификации на основе определения наименьшего расстояния имеет свои ограничения. Он требует, чтобы данные были представлены в виде средних векторов для каждого класса и каждого спектрального диапазона, что может потребовать дополнительных вычислений и времени на этапе обучения. Кроме того, алгоритм может быть чувствителен к выбросам в данных или к попаданию в область, где расстояние до нескольких классов оказывается примерно одинаковым.

Однако благодаря своей простоте и распространенности алгоритм классификации на основе определения наименьшего расстояния остается одним из наиболее популярных и используемых методов в классификации объектов по их характеристикам и спектральным диапазонам.

Алгоритм параллелепипеда является эффективным и простым методом классификации, основанным на использовании статических показателей обучающей выборки в спектральных диапазонах. Его применение осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе происходит вычисление среднего значения яркости в обучающей выборке для каждого класса классифицируемых объектов, а также соответствующего ему спектрального диапазона. Это позволяет установить базовые параметры для последующей классификации.

На втором этапе применяются следующие правила к каждому пикселю снимка для его классификации. Пиксель считается принадлежащим определенному классу, если значение его яркости находится в пределах, определенных нижней и верхней границей соответствующего спектрального диапазона. Именно этот критерий определяет принадлежность пикселя к тому или иному классу.

Множество точек в пространстве, которые соответствуют определенному условию, образует параллелепипед в пространстве спектральных признаков. Если яркостные значения пикселей находятся внутри этого параллелепипеда, то такие пиксели относятся к определенному классу. Однако, если значения яркости находятся за пределами параллелепипеда, пиксель классифицируется как неклассифицируемый (Rees, 2001; Chandra, Ghosh, 2006).

Исследования, проведенные А. М. Chandra и его соавтором (2006), открывают новые перспективы в области классификации пикселей и помогают лучше понять процесс формирования параллелепипеда в пространстве спектральных признаков. Это важный шаг в направлении развития алгоритмов обработки изображений и анализа спектральных данных.

Таким образом, алгоритм параллелепипеда позволяет эффективно производить классификацию пикселей снимка, основываясь на параметрах яркости и спектральных диапазонах, полученных из обучающей выборки. Его простота и надежность делают его очень популярным среди специалистов в области обработки изображений и распознавания образов.

Алгоритм, основанный на методе максимального правдоподобия, представляет собой эффективный подход, лишенный существенных недостатков. Его использование позволяет определить класс, к которому относится каждый пиксель, максимизируя функцию правдоподобия. Для проверки принадлежности

пикселя определенному классу используется следующий подход: пиксель считается принадлежащим данному классу, если вычисленная вероятность значений пикселя превышает вероятность того, что данный класс существует.

Вычисление вероятности значений пикселя основывается на среднем векторе измерения и ковариационной матрице для каждого класса, а также на величине спектрального диапазона. Этот подход был предложен в работе А. М. Chandra и соавтора (2006).

Таким образом, алгоритм, основанный на методе максимального правдоподобия, позволяет достичь точности и эффективности при определении классов пикселей на основе их значений, учитывая статистические параметры и спектральный диапазон.

Если на однородных снимках отсутствуют дополнительные сведения о классифицируемых объектах, то вероятность для всех классов будет одинаковой. Однако если у оператора есть информация о том, что некоторые классы имеют большую вероятность существования, чем другие, то он может задать заранее определенные значения априорной вероятности для соответствующих спектральных признаков.

Установление априорных значений вероятности является важным шагом в классификации объектов на основе спектральных данных. Оператор может использовать свои знания и опыт для определения этих значений, учитывая предварительную информацию о вероятности присутствия определенных классов. Таким образом, задание априорных значений вероятности позволяет улучшить точность классификации и более точно определить принадлежность объектов к определенным классам.

Важно отметить, что задание априорных значений вероятности необходимо осуществлять с учетом достоверности и актуальности предоставленной информации. Оператор должен обладать достаточными знаниями и навыками для правильного определения этих значений, чтобы избежать искажения результатов классификации.

Таким образом, установление априорных значений вероятности представляет собой важный аспект процесса классификации объектов на основе спектральных признаков. Это позволяет оператору более точно определить принадлежность объектов к различным классам и повысить общую точность классификации.

Использование априорных вероятностей в анализе территории по данным космической съемки является эффективным инструментом, который позволяет учесть особенности рельефа и других характеристик данной местности. Априорные вероятности, основанные на предшествующих исследованиях и статистических данных, позволяют получить более точные результаты и прогнозы при наличии достаточных данных, при их отсутствии или недостаточности результаты классификации оказываются не самыми лучшими (Chandra, Ghosh, 2006).

При этом необходимо отметить, что использование этого метода требует значительных вычислительных ресурсов. В связи с тем, что расчеты производятся с учетом сложных математических моделей и большого объема данных, необходимо обеспечить доступ к мощным компьютерным системам.

Кроме того, следует учесть, что априорные вероятности могут быть не всегда доступны или точно определены для конкретной территории. В таких случаях необходимо полагаться на другие методы анализа или проводить дополнительные исследования для получения более точных данных.

Тем не менее использование априорных вероятностей в географическом анализе является важным инструментом, который позволяет учитывать сложность и разнообразие территорий.

1.7 Особенности дешифрирования растительного покрова с использованием данных дистанционного зондирования

Необходимо отметить, что на результат дешифрирования может оказывать влияние большое количество факторов, поэтому для получения надежных

результатов необходимо учитывать их влияние перед началом проведения работ. Например, при высоком положении Солнца на небосклоне и отсутствии облачности или дымки преобладает прямая радиация, что приводит к вариации освещенности (для горных лесов) территорий, имеющих разную экспозицию, это означает, что некоторые склоны находятся на солнце, в то время как другие оказываются в тени или полутени. Для успешного дешифрирования снимков таких территорий и повышения точности результатов необходимо использовать снимки, полученные при различной высоте Солнца.

Необходимо отметить, что зеленые насаждения наиболее успешно дешифрируются, если снимки делаются при высоком положении Солнца (солнечная высота более 40°) и в условиях, когда размеры теней минимальны. Это обстоятельство позволяет повысить надежность дешифрирования и обеспечить более точные результаты при работе с зелеными насаждениями. Этот факт следует учитывать при планировании съемок и дешифрировании снимков при проведении геоинформационных исследований в подобных условиях, чтобы достичь наиболее точных результатов при работе с различными природными условиями.

Отдельным критерием дешифрирования аэрокосмических снимков является распознавание на данных дистанционного зондирования растительного покрова, включая распознавание разных древесных пород. Спектральная отражательная способность лиственных и хвойных пород в определенных частях спектра отличается (рисунок 1.1).

Растительность является объектом с наибольшей спектральной селективностью на земной поверхности. Ее отражательные свойства зависят от четырех основных факторов.

Первый фактор – оптические свойства зеленых листьев. Зеленый цвет листьев вызван наличием хлорофилла, который поглощает большую часть видимого света, за исключением зеленой части спектра, которая отражается и делает растения заметными для глаз наблюдателя.

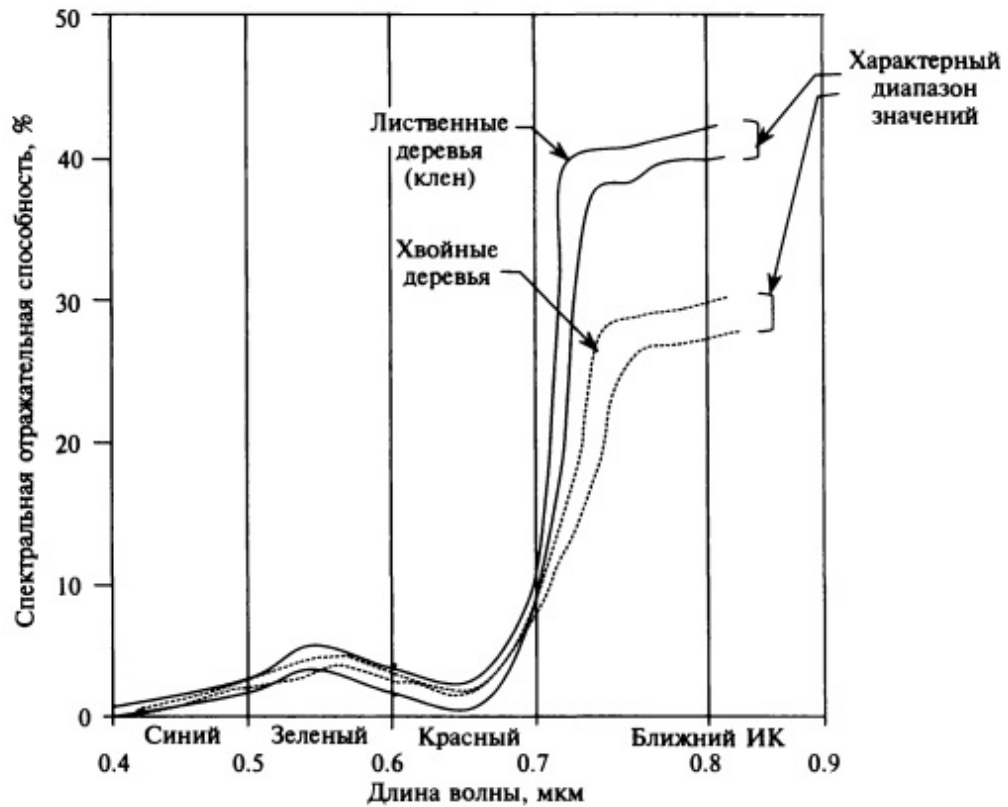


Рисунок 1.1 – Спектральная отражательная способность хвойных и лиственных насаждений (Chandra, Ghosh, 2006)

Второй фактор – геометрия растений. Структура и форма растений оказывают влияние на процент отражения света. Например, листья с выступающими жилками могут создавать блеск, который вносит изменения в отражательные свойства.

Третий фактор – индекс листовой поверхности. Большое количество крупных листьев на растении увеличивает его отражающую способность, поскольку больше поверхности доступно для отражения света.

Четвертый фактор – угловое распределение листьев. Угол между поверхностью листа и направлением падающего света влияет на количество отраженного света, а, соответственно, и на отражательные свойства растения.

Кроме того, в растительном покрове земной поверхности важную роль играет образование сплошного покрова растений. Помимо этого фактора, также следует учитывать отражательную способность почвы, так как она вносит свой

вклад в общие отражательные свойства растительного покрова. И, наконец, структура растительного покрова, т. е. характер пространственного размещения растений, оказывает влияние на поглощение и отражение света, что вносит различия в отражательные свойства (Кринов, 1947; Лабутина, 2004). Таким образом, все эти факторы вместе определяют отражательные свойства растительного покрова, делая его самым спектрально селективным объектом на Земле. При этом растительность характеризуется более сложной кривой спектрального отклика на излучение (Chandra, Ghosh, 2006) (рисунок 1.2).

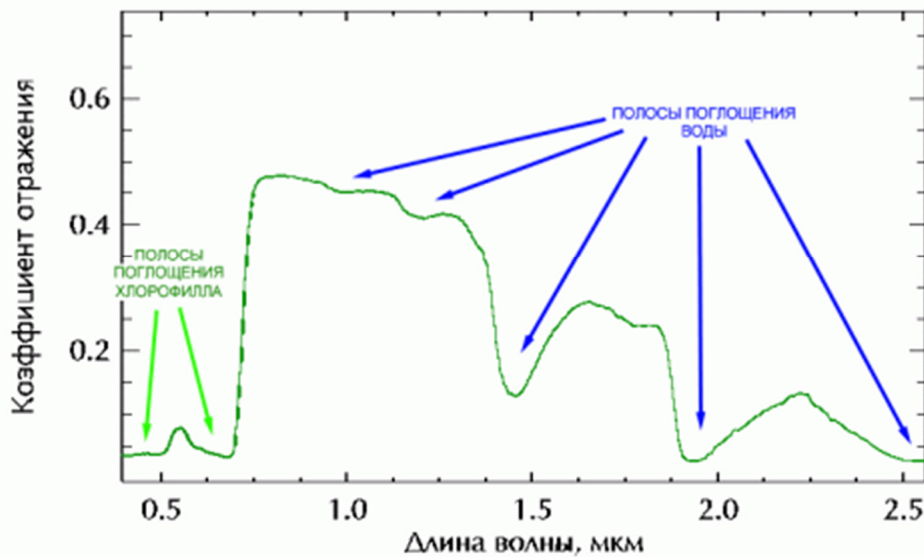


Рисунок 1.2 – Характеристика отклика растительности по величине коэффициента отражения от длины волны (Chandra, Ghosh, 2006)

Одной из особенностей дешифрирования растительности с использованием ДЗЗ является то, что ее спектральные характеристики обладают сезонной изменчивостью. Отражательная способность листьев меняется по мере роста и формирования листовой пластинки. Так, в конце июня наблюдается наивысшая яркость у кроны березы, когда ее молодая листва полностью распускается, но содержание хлорофилла в ней еще не достигает своего пика. При этом к середине июля в листве березы хлорофилл начинает накапливаться больше, что приводит к некоторому понижению яркости в области ближнего инфракрасного спектра

(Рачкулик, Ситникова, 1981; Кондратьев, Федченко, 1982; Кучко, 1988). Необходимо отметить, что дальнейшее увеличение содержания хлорофилла приводит к уменьшению коэффициентов спектральной яркости в видимой части спектра, особенно в красном диапазоне излучения у сосны и березы, в связи с тем, что хлорофилл обладает большим максимумом поглощения излучения в красной зоне спектра (Рачкулик, Ситникова, 1981; Кондратьев, Федченко, 1982; Кучко, 1988). В процессе старения и увядания наблюдается повышение отражательной способности листового покрова лесных насаждений в видимой области спектра. Изменение характера распределения яркости пикселей на снимках в видимой области спектра происходит благодаря увеличению относительного содержания желтых и красных пигментов в листьях. Это явление наблюдается в растениях в течение всего сезона вегетации (Кучко, 1988).

Все растения проходят определенные фазы развития в течение сезона. Время прохождения этих фаз изменяется в зависимости от метеорологических условий данного года. При этом порядок прохождения фаз и растительный аспект в фазах остаются устойчивыми. Таким образом, изменение характера распределения яркости пикселей на снимках в видимой области спектра является результатом смены фаз развития растений и возрастания содержания желтых и красных пигментов в их листьях. Особенности сезонного развития необходимо использовать при дешифрировании породного состава древесной растительности (Кринов, 1947; Кондратьев, Федченко, 1982; Кучко, 1988).

С одной стороны, распознавание лесных насаждений, состоящих из хвойных пород, на снимках лучше всего проводить зимой, когда на земле есть снежный покров. В таких условиях хвойные деревья имеют более темный оттенок и легко различимы на изображениях.

С другой стороны, смешанные древостои с преобладанием лиственных пород лучше всего распознавать на снимках, сделанных весной. В это время года молодые листья лиственных пород имеют более высокую яркость в видимом спектре, и деревья лиственных пород отражаются на снимках светлыми пикселями.

Необходимо также учесть, что к середине лета спектральные различия между разными породами нивелируются, что усложняет точное распознавание насаждений на снимках (Лабутина, 2004).

К концу периода вегетации, когда содержание хлорофилла в листе начинает снижаться, наблюдается максимум различий в спектральной яркости разных пород деревьев, поэтому временной интервал в конце периода вегетации является наилучшим для распознавания породного (особенно лиственного) состава лесов по снимкам (Рачкулик, Ситникова, 1981; Кучко, 1988; Лабутина, 2004).

При дешифрировании растительного покрова применяют как полутоновые, так и спектрзональные или многозональные (мульти- и гиперспектральные) снимки. Как правило, полутоновые космические снимки обладают более высоким пространственным разрешением, а спектрзональные, мульти- и гиперспектральные снимки дают возможность получить больше информации о видовом составе и состоянии растительности (Лабутина, 2004; Rees, 2001).

Пространственное разрешение необходимо подбирать таким образом, чтобы оно отвечало требованиям поставленных перед оператором задач для достижения заданного результата, при этом наблюдается то, что высокое пространственное разрешение не всегда позволяет провести дешифрирование на высоком уровне в сравнении с данными дистанционного зондирования с более низким пространственным разрешением (Rees, 2001). Также при проведении работ необходимо учитывать факт того, что стоимость данных дистанционного зондирования напрямую зависит от пространственного разрешения вида съемки и типа платформы.

1.8 Использование спектральных индексов при исследовании лесных насаждений

С начала изучения данных космической съемки и до настоящего времени российскими и иностранными учеными разработано более 200 спектральных

индексов, разработанных при сочетании различных методик расчета и использования параметров спектра в различных диапазонах. При изучении растительных сообществ, включая лесные, используются диапазоны волн, которые на космических снимках представлены следующими каналами: 0,630–0,690 мкм соответствует красному цвету, 0,450–0,520 мкм соответствует синему цвету, 0,750–0,900 мкм соответствует ближнему инфракрасному спектру, 0,525–0,605 мкм соответствует зеленому цвету, 1,550–1,750 мкм и 2,080–2,350 мкм соответствуют среднему инфракрасному спектру (Rees, 2001).

Проведенные исследования в данной области доказывают возможность анализа лесных насаждений как по биофизическим (определение состояния древостоев), так и таксационным характеристикам древостоев по данным дистанционного зондирования при условии применения спектральных диапазонов и индексов наиболее информативных (чувствительных) к изменению показателей лесных насаждений (Lambin, 1999; Lu et al., 2004; Chen, Zhao, 2007 и др.).

Спектральная отражательная способность объектов изучения и рассчитанные на основе этих данных спектральные индексы по способу расчета разделяются на следующие группы (Lu et al., 2004).

1. Индексы, основанные на преобразовании цифрового изображения данных дистанционного зондирования (Image transform) – PC₃, PC₂, PC₁, KT₃, KT₂, KT₁, MID₅₇, VIS₂₃.

2. Индексы комплексной оценки растительного покрова (Complex vegetation indices) – GEMI, MSAVI, SAVI, ASVI, ARVI.

3. Вегетационные индексы (нормализованные показатели растительного покрова) (Normalized vegetation indices) ND₃₂, ND₅₇, ND₅₄, ND₅₃, NDVI.

4. Индексы простого соотношения каналов съемки (Simple ratio) – TM₅/TM₇, TM₅/TM₄, TM₅/TM₃, TM₄/TM₃.

Анализ проведенных исследований по установлению изменений, произошедших в растительных сообществах, указывает на то, что индекс спектральной отражательной способности EWDI (enhanced wetness difference image) максимально чувствителен к изменениям, происходящим в лесных

насаждениях (King et al., 2005; Virk, King, 2006 Jupiter; Marion, 2008). Усовершенствованный влажностный индекс (EWDI) основан на применении преобразования изображения Каута – Томаса с использованием алгоритма Tasseled Cap (Kauth, Thomas, 1976), который разработан и адаптирован для обработки цифровых данных космической съемки, полученных со спутника Landsat (Crist, Cicone, 1984). При этом необходимо отметить, что используемые при получении индекса космические снимки обязательно должны быть атмосферно и радиометрически откорректированы, а также пройти конвертацию в коэффициенты отражения, характеризующие свойства отражающих объектов (альбедо) напрямую без влияния угла стояния солнца и состояния атмосферы.

При исследовании спектральной отражательной способности древостоев необходимо учитывать региональные особенности произрастания лесной растительности, так как природно-климатические особенности района могут оказывать влияние на спектральные характеристики древостоев. В связи с этим необходимо тщательно относиться к подбору спектральных индексов и коэффициентов, используемых для оценки состояния и структуры лесных насаждений, а также оценке многолетних изменений (Барталев, 2007; Kajisa et al., 2009).

1.9 Оценка состояния древесной растительности с использованием данных дистанционного зондирования

Оценка экологического состояния лесных насаждений имеет большое значение на современном этапе развития дистанционных методов изучения растительного покрова. В последнее время как в России, так и за рубежом проведены многочисленные исследования, направленные на изучение как таксационных характеристик лесных насаждений, так и состояния лесных биогеоценозов с использованием данных дистанционного зондирования. Ниже приведен ряд авторов, работы которых связаны с обработкой и анализом данных дистанционного зондирования применительно к компонентам лесных насаждений

при использовании цифровых снимков разного пространственного разрешения: М. А. Ильючик (2002), С. С. Барталев (2006), А. С. Исаев (2009), А. С. Черепанов (2009). Разработки в области мониторинга состояния лесных насаждений с использованием данных низкого пространственного разрешения проводили: С. А. Барталев (2002), Н. Г. Харин (2003), А. С. Исаев и др. (2009), М. А. Болсуновский (2010), А. С. Плотникова (2019), Ф. В. Стыщенко (2019).

Анализом динамики лесных насаждений для отдельных субъектов РФ занимались следующие исследователи: В. М. Жири́н (1997), В. И. Кравцова (2002), С. С. Барталев (2006), Т. В. Черенькова (2009), О. Н. Воробьев (2016), создана карты типов леса для бореальных экосистем Евразии С. С. Барталевым (2002).

Научными исследованиями, направленными на оценку биомассы, продуктивности лесных насаждений, а также биометрических и биофизических характеристик древостоев, занимались следующие специалисты: И. О. Марущак и В. В. Елсаков (2010), М. А. Медведева и др. (2010), работы по геоинформационному моделированию экосистем выполнены А. А. Сороковым и И. Н. Владимировым (2010), В. В. Фоминым (2012). Работы по моделированию возрастной структуры лесных насаждений и их картированию выполнены И. Н. Владимировым (2010), моделированию пространственно-временной динамики И. Н. Владимировым и А. К. Поповой (2009) по инвентаризации лесов и определению количественных характеристик лесных насаждений – В. И. Сухих, В.М. Жири́н (2005) и др.

Отдельно необходимо отметить работы по изучению состояния лесных насаждений и растительности при использовании вегетационных индексов А. С. Черепанова, Е. Г. Дружининой (2009), Е. В. Варламовой, В. С. Соловьева (2010), М. А. Медведевой и др. (2010), работы по изучению изменения спектральной отражательной способности лесных насаждений в зоне аэропромышленного загрязнения А. В. Андреевой и др. (2007), Н. Ф. Низаметдинова (2009), А. А. Николаева, В. В. Фомина (2023).

Необходимо отметить прогресс развития методов обработки и дешифрирования цифровых данных съемки земной поверхности (Фраленко, 2014), что, в свою очередь, повышает уровень проведения мониторинга лесных экосистем и позволяет более точно оценивать их экологическое состояние.

Исследования, направленные на изучение структуры и состояния лесных насаждений при использовании данных дистанционного зондирования, можно разделить на три группы (уровня) (Boyd, Danson, 2005):

- первая группа – анализ пространственно-временной динамики лесных насаждений;

- вторая группа – анализ спектральных характеристик лесных насаждений, направленный на дешифрирование древесных пород и определение структуры древостоев;

- третья группа – анализ таксационных и биофизических параметров лесных насаждений и их взаимосвязь со спектральной отражательной способностью древостоев.

К первой группе можно отнести работы, связанные с оценкой изменения границ лесных насаждений во времени. Можно отметить большое количество публикаций, в которых приведены результаты исследований тропических лесов в связи с тем, что изменения в них происходят довольно интенсивно.

Анализ пространственно-временной динамики лесных зеленых насаждений (покрытых лесом земель) широко используется для мониторинга состояния лесов и оценки изменений в них. Он включает в себя несколько основных направлений исследований.

Первое направление – это установление границ лесных земель, что является важной задачей, так как позволяет отличить лесные земли от земель других категорий, таких как сельскохозяйственные угодья или земли населенных пунктов и др. Полученные результаты могут служить основой для разработки стратегий сохранения и устойчивого управления лесными ресурсами.

Второе важное направление – это выявление лесных пожаров и оценка площадей поврежденных лесных насаждений. Лесные пожары являются

значительной угрозой для лесных экосистем и часто приводят к значительному ухудшению или гибели древостоев на значительных площадях, пройденных огнем. Анализ динамики лесных пожаров позволяет выявить области с высокой вероятностью возникновения пожаров и принимать меры по их предотвращению и тушению. Кроме того, оценка площадей поврежденных насаждений позволяет оценить уровень ущерба и разработать планы восстановления лесов.

В рамках данного направления исследований совершенствуются методы анализа и обработки космических снимков, включая использование данных радарной съемки, а также прорабатываются методики использования комбинации данных космической съемки различных сенсоров (Salajanu, Olson, 2001).

При анализе динамики покрытых лесом земель интенсивное развитие получили алгоритмы обработки цифровых данных. Наиболее важную роль в определении покрытых и не покрытых лесом земель играет метод бинарной классификации признаков. Методы обработки данных космической съемки, основанные на использовании классификации спектральных и других признаков изображения, широко применяются в картографировании лесных насаждений (Hansen et al., 1996), анализе воздействия сезонных изменений спектральной отражательной способности лесных насаждений на точность их дешифрирования (Murakami, 2004), анализе изменений параметров лесных насаждений, подвергнутых воздействию стихийных бедствий (King et al., 2005), анализе антропогенного влияния на лесные насаждений (Lambin, 1999; Jha et al., 2005; Kozak et al., 2007; Matsushita et al., 2010), а также мониторинге восстановления состояния хвойных лесов (Hermosilla et al., 2016).

Для анализа лесных насаждений широкое распространение получили данные полученные со спутников Landsat TM, ETM+ (Nordberg, Evertson, 2005; Virk, King, 2006; Bohlman et al., 2010; Yang et al., 2022), в том числе для оценки изменений покрытых лесом земель во временных интервалах, охватывающих несколько десятилетий (Jupiter, Marion, 2008; Hermosilla et al., 2016; Zhao et al., 2018; Assal et al., 2021).

Необходимо отметить, что отдельно развивается направление, связанное с совершенствованием методов дешифрирования лесных насаждений (лесных земель) с использованием разновременных данных дистанционного

зондирования. При использовании разновременных данных необходимо учитывать особенности коррекции изображений по атмосферному, геометрическому и радиометрическому параметрам исходных данных (Song et al., 2007).

Ко второй группе можно отнести исследования, связанные с дешифрированием древесных пород в лесном насаждении (Landenburger et al., 2008). На первоначальном уровне дешифрирования структуры лесных насаждений используется визуальное дешифрирование в сочетании с контролируемой классификацией (Murakami, 2004). В последнее время исследования, направленные на определение древесных пород в лесном насаждении сосредоточены на разработке методик и повышении их точности при классификации параметров данных космической съемки (Jing et al., 2009) и использовании дополнительных данных, характеризующих пространственное расположение деревьев (Fomin et al., 2022), и данных полевой таксации.

К третьей группе можно отнести исследования, связанные с анализом таксационных характеристик, показателей продуктивности лесных насаждений и некоторые биофизические характеристики, оказывающие влияние на спектральную отражательную способность (Барталев, 2007). Количественная оценка характеристик лесных насаждений является трудоемкой и сложной задачей. При этом ее решение открывает возможности для количественной оценки состояния лесных насаждений по данным дистанционного зондирования. Анализ перечисленных выше показателей и характеристик лесных насаждений основан на оценке отражательной способности древостоев, расположенных на конкретных лесных участках (пробных площадях). При этом необходимо отметить, что указанные характеристики лесных насаждений выступают основными параметрами, отражающими экологическое состояние лесных насаждений. Использование материалов дистанционного зондирования при оценке биофизических характеристик лесных насаждений в первую очередь основано на анализе связи биохимических и биофизических свойств древесных растений в насаждении с параметрами их отражательной способности (Chen, Zhao, 2007).

Анализ состояния лесных насаждений выполняется с использованием эмпирического моделирования отношений между параметрами, характеризующими древесную растительность, и данными дистанционного зондирования или производными от них, например, спектральных индексов или диапазонов с таксационными характеристиками лесных насаждений (Zhao et al., 2018).

Оценка состояния лесных насаждений осуществляется по значениям индекса листовой пластинки. Анализу данного индекса – одного из основных показателей, характеризующих активность фотосинтеза растений, – посвящено большое количество публикаций. Использование спектрального индекса NDVI для оценки индекса листовой пластинки как для отдельных участков, так и для хвойных и смешанных лесов бореальной зоны, приведено в многочисленных работах (Ji, Jensen, 1999; Hall et al., 2003; Eklundh et al., 2005; Zhao et al., 2018 и др.).

Оценка состояния лесных насаждений может производиться по таксационным характеристикам древостоев, например по фитомассе (Tsutsumi et al., 2005; Wulder et al., 2008; Kajisa et al., 2009), чистой первичной продукции (Berberoglu et al., 2007), сомкнутости полога (Kim et al., 2006), запасы (Makela, Pekkarinen, 2001), полноте (Franco-Lopez et al., 2001; Pu et al., 2003), а также комплексу характеристик древостоев исходя из комбинации таксационных и биофизических параметров лесных насаждений (Барталев, 2007; Фомин, 2012; Lu et al., 2004; Chen, Zhao, 2007).

ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Характеристика района 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). На рисунке 2.1 приведен фрагмент карты (по данным сайта maps.google.com) с обозначением границы района исследований. Координаты левого нижнего и правого верхнего углов исследованной территории соответственно: N56°40.57' E59°27.19' и N57°4.01' E60°29.23' в.д.

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).

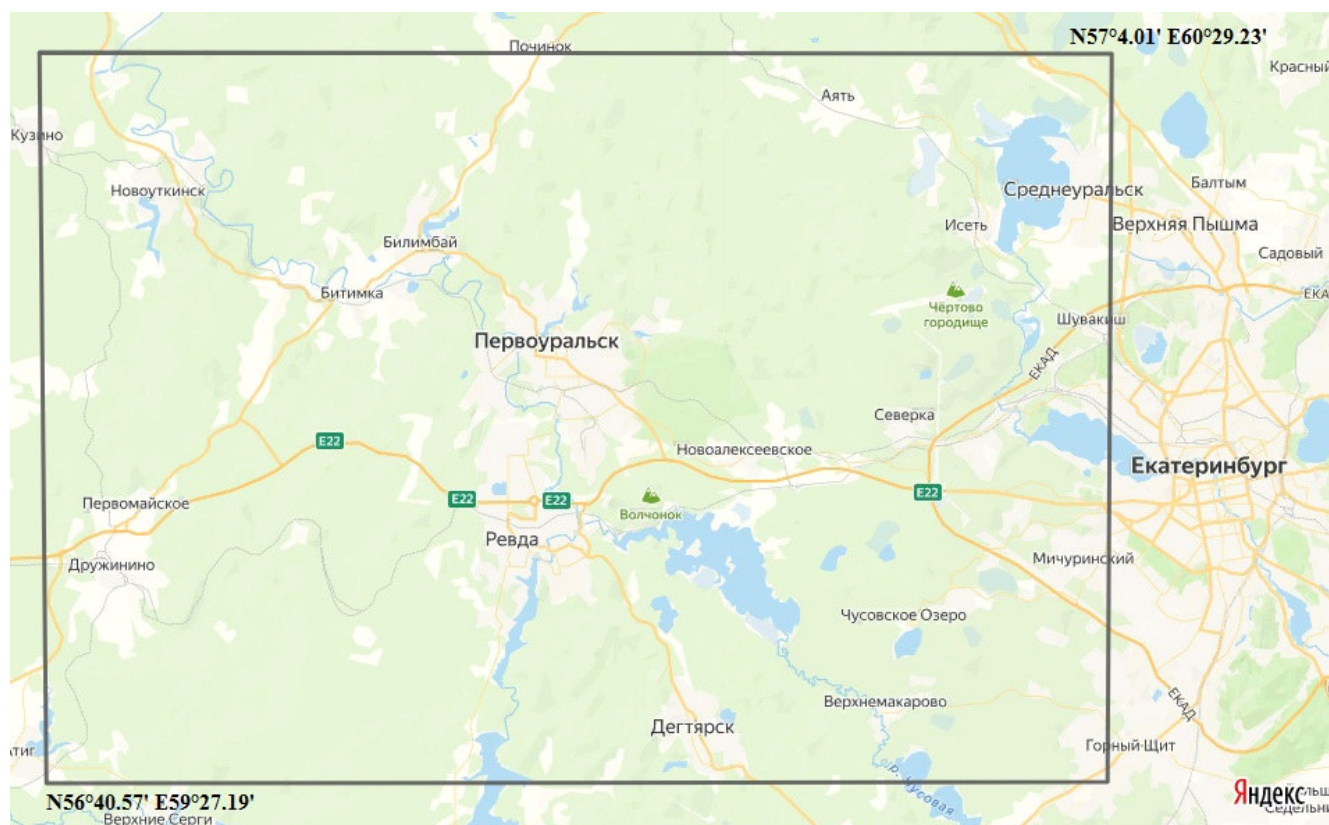


Рисунок 2.1 – Карта-схема расположения района исследований с координатами углов левого нижнего и правого верхнего. Рамкой черного цвета показана граница района исследований

В данном районе можно обнаружить различные типы почв, такие как бурые горно-лесные, глеево-подзолистые, подзолистые, серые оподзоленные, дерново-подзолистые, темно-серые и глееватые. А в поймах рек, нашедших свое место в этой местности, встречаются дерново-луговые почвы (Борисевич, 1968; Фирсова и др., 1982, 1986; Зубарева, 1986).

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 черновую медь, ксантогенат, серную кислоту и двойной суперфосфат (Капустин, Корнеев, 1996). Все эти продукты имеют важное значение в различных отраслях, однако их производство сопровождается высоким уровнем загрязнения окружающей среды.

В период с 2005 по 2009 г. на СУМЗе проведена масштабная реконструкция и техническое перевооружение химико-металлургического комплекса предприятия. Этот этап экологической модернизации стал ключевым в реализации программы, что позволило внедрить новые технологии, оборудование и системы очистки, значительно повысив экологическую безопасность производства, сократить потребление ресурсов и минимизировать количество отходов (СУМЗ: Общая информация..., 2023).

В результате реализации экологической программы к концу 2010 г. предприятию удалось достичь уменьшения негативного воздействия на окружающую природную среду и соблюсти нормативы предельно допустимых выбросов по всем загрязняющим веществам (рисунок 2.2).

В районе исследований, помимо СУМЗа, расположен еще один важный промышленный объект – Ревдинский завод обработки цветных металлов. Этот завод, находящийся в городе Ревде, специализируется на производстве проката и изделий из цветных металлов.

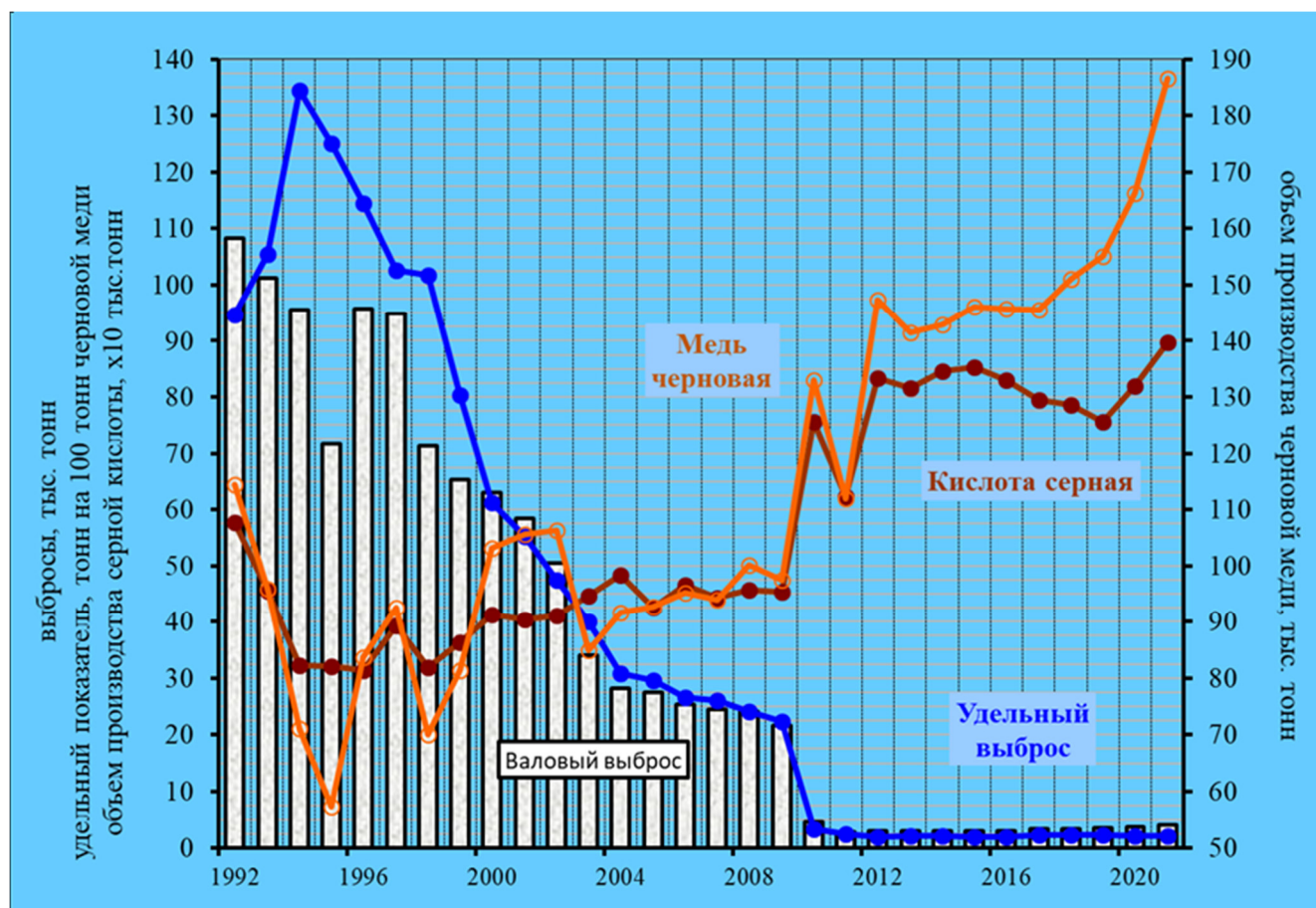


Рисунок 2.2 – График выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в сопоставлении с объемом производства черной меди (СУМЗ: Общая информация..., 2023)

Черная металлургия представлена Ревдинским метизно-металлургическим заводом. В г. Первоуральске располагается одно из крупнейших предприятий по производству труб в стране – Первоуральский новотрубный завод. Одним из старейших предприятий химической промышленности Среднего Урала является Первоуральский хромпиковый завод. Главное сырье для этого предприятия – хромистый железняк, который уже долгое время добывается в окрестностях города. Помимо этих предприятий ежегодно, выбрасывает во внешнюю среду 1862 т диоксида азота ТЭЦ г. Первоуральска, что оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду (Капустин, Корнеев, 1996).

2.2 Программа работ

1. Провести анализ литературных данных о состоянии проблемы дешифрирования космических снимков для целей лесоустройства и оценки состояния древостоев в зоне влияния аэропромышленных 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) 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.

2.3 Методики исследований

2.3.1 Проведение снегомерной съемки и сбора проб снега

Разработка методики, отвечающей современным требованиям количественного учета величины снеготпасов на всех элементах ландшафта, может идти двумя путями: 1 – увеличение густоты точек измерения высоты снежного покрова на маршруте; 2 – выбор оптимального количества маршрутов и их распределение по длине водосбора (Копанев, 1971). Для поставленных целей был использован принцип проведения снегомерных съемок – ландшафтно-маршрутный (Копанев, 1971).

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. Накопление снега зависит от лесной формации (Водорегулирующая роль..., 1990; Луганский, 1996). По накоплению снега лесными формациями можно выделить следующий ряд по уменьшению количества накопленного снега: 1 – лиственные насаждения и лиственничники, 2 – смешанные насаждения лиственных и хвойных пород, 3 – сосняки, 4 – темнохвойные насаждения (Луганский и др., 1996). Таким образом, снегомерные наблюдения проводились с учетом естественных просветов в чистых хвойных насаждениях, под пологом лиственных деревьев в смешанных и лиственных древостоях.

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.

Рейка снегомерная является неотъемлемой частью снегомерных исследований, и ее использование подразумевает соблюдение одного важного условия – она всегда должна быть перпендикулярна участку земной поверхности. Это дает возможность получить максимально точные и достоверные результаты

при измерении высоты снежного покрова. Рейка снегомерная оснащена маркировкой, которая позволяет легко определить высоту снежного покрова.

Вторым важным прибором для снегомерных исследований является снегомер весовой типа ВС-43. Его основная функция – определение плотности снега путем проведения снегомерных съемок. Снегомер весовой ВС-43 состоит из металлического цилиндра и весов. Цилиндр обладает сантиметровой шкалой на наружной стороне, которая используется для измерения высоты вырезаемого столба снега. Нулевая отметка шкалы совпадает с нижним срезом кольца на снегомере, что обеспечивает точность и надежность измерений.

Снегомерные наблюдения на точках съемки проводили снегомерной рейкой на 30 промерных точках в радиусе 10–15 м, для вычисления средней высоты снежного покрова. На каждой снегомерной точке были взяты пробы снега с помощью снегомера весового в 3 промерных точках, расстояние между точками взятия проб – 5 м. Снег из снегомера укладывался в полиэтиленовый пакет и упаковывался для дальнейшего проведения химического анализа. Плотность снежного покрова определялась не весовым способом, а по отношению талой воды, полученной из проб снега, к объему снега в пробе.

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 высоте снега, фитотоксичности и кислотности снеговой воды. Пространственный анализ данных был выполнен с использованием геоинформационной системы QGIS (qgis.org).

2.3.2 Определение фитотоксичности и кислотности снеговой воды

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). Рост культуры определяли по разнице оптической плотности суспензии водорослей в начале и конце культивирования. Критерием

токсичности проб воды по данному методу является среднее снижение оптической плотности более чем на 20 % по сравнению с таковой на контроле при ингибировании роста тест-культуры и увеличение более чем на 30 % при стимуляции процесса роста.

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). В качестве показателя степени токсичности используется отношение зарегистрированных значений ЗФ, нормированных на значения параметров ЗФ контрольного образца без токсиканта. Эта величина называется коэффициентом токсичности (Кт). Превышение абсолютного значения Кт 0.2 свидетельствует о токсичности исследуемого образца. Определение фитотоксичности снеговой воды проводили соавторы метода – Н. В. Марина и Г. Н. Новоселова.

2.3.3 Анализ данных метеонаблюдений

Мезоклимат района исследования анализировался с использованием данных инструментальных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных в меридиональном градиенте (рисунок 2.3). В работе были использованы данные метеонаблюдений из архива сайта 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) и данных цифровой модели рельефа Свердловской области (NASA).

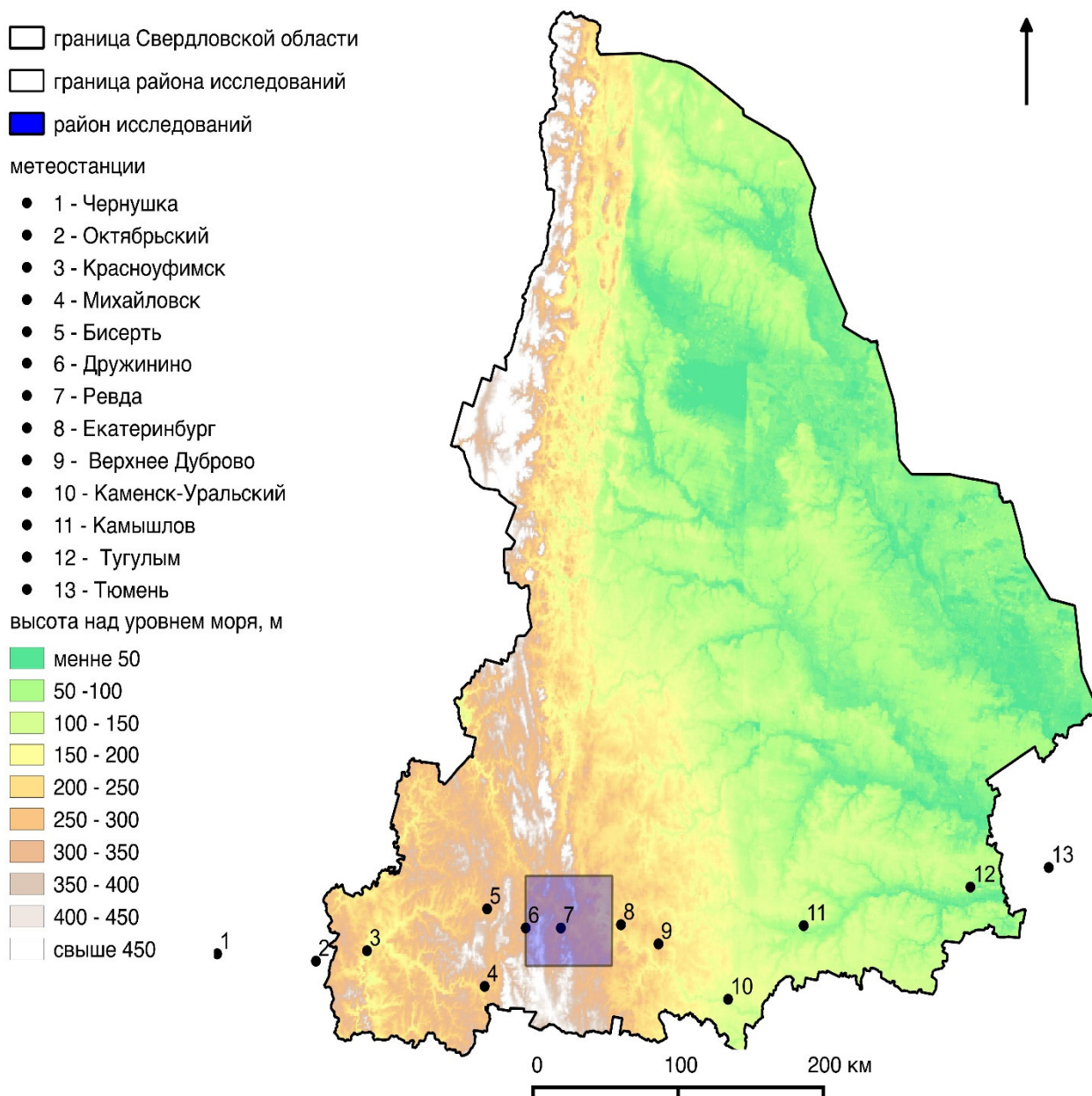


Рисунок 2.3 – Картосхема, характеризующая рельеф Свердловской области, с обозначением района исследований и метеостанций в меридиональном градиенте

2.3.4 Создание картосхемы антропогенных ландшафтов и состояния лесов района исследований

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) 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.

2.3.5 Обработка космических снимков

Исследование лесных насаждений с использованием цифровых спектральных снимков требует интеграции данных о полевой таксации древостоев. Снимки, полученные при помощи сенсора Landsat 7 ETM+ данного космического аппарата, обладают необходимым пространственным и радиометрическим разрешением и специально разработанными алгоритмами для изучения характеристик лесных насаждений (Lu et al., 2004).

Выполнение исследований по оценке спектральной отражательной способности древостоев и их связи с таксационными параметрами лесных насаждений, а также проведению расчета зависимостей между данными полевой

таксации и данных космической съемки требует максимального соответствия времени получения указанных данных. Требуемая информативность данных космической съемки подразумевает наличие количественной взаимосвязи между таксационными характеристиками лесных насаждений и спектральной отражательной способностью древостоев, выраженной в виде спектрального диапазона или индекса.

При выполнении исследования использованы космические снимки спутника Landsat TM/Landsat ETM с 1990-х годов до настоящего времени. При изучении взаимосвязи данных наземных измерений на 15 пробных площадях, заложенных в районе исследований во второй половине 1990-х, и данных космической съемки был использован космический снимок Landsat TM 1996 г.

Данные космической съемки Landsat являются мультиканальными. Каналы соответствуют диапазонам в зеленой, ближней инфракрасной, синей, красной, тепловой и средней инфракрасной областях спектра. При этом тепловой канал 6 использован только для проведения атмосферной коррекции снимка.

Проведение дешифрирования данных дистанционного зондирования возможно как с использованием автоматизированных методик классификации изображения, так и с использованием методик визуального распознавания объектов (ручной способ). Применение различных способов дешифрирования космических снимков позволяет успешно классифицировать нелесные земли и земли, покрытые лесной растительностью (Murakami, 2004; King et al., 2005).

Наиболее оптимальным вариантом составления и ведения актуальной информации электронной лесной карты масштаба 1:10 000 является составление указанной карты на основе материалов лесоустройства или данных дистанционного зондирования высокой степени разрешения 1 м/пиксель.

Для составления электронной карты лесных участков, расположенных в районе исследований, использованы материалы лесоустройства, при обработке которых получены векторные карты, отражающие границы лесных выделов.

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).

На основе результатов изучения структуры и состояния лесных насаждений, как отечественными, так и иностранными авторами использующих различных комбинации спектральных индексов (Бондур, Воробьев, 2015; Стыценко и др., 2019; Николаев, Николаева, 2022; Lambin, 1999; Lu et al., 2004; Chen, Zhao, 2007 и др.), были подобраны наиболее информативные спектральные индексы (таблица 2.1), которые применяются для исследования растительности бореальной зоны, в том числе для оценки изменения состояния лесных насаждений.

Таблица 2.1 – Спектральные индексы преобразования изображения (Image transform), рассчитываемые для оценки экологического состояния лесных насаждений (сенсор Landsat) по каналам съемки (КС)

№	Спектральный индекс	Формула расчета индекса
1	РС ₃	$0,266 КС_7 + 0,472 КС_5 + 0,140 КС_4 + 0,504 КС_2 + 0,616 КС_3 + 0,230 КС_1$
2	РС ₂	$0,787 КС_4 + 0,372 КС_7 + 0,421 КС_5 + 0,121 КС_2 + 0,212 КС_3 - 0,079 КС_1$
3	РС ₁	$0,595 КС_4 + 0,143 КС_3 + 0,321 КС_7 + 0,709 КС_5 + 0,054 КС_1 + 0,130 КС_2$
4	КТ ₃	$-0,457 КС_7 - 0,711 КС_5 + 0,328 КС_3 + 0,341 КС_4 + 0,151 КС_1 + 0,197 КС_2$
5	КТ ₂	$-0,544 КС_3 - 0,180 КС_7 - 0,285 КС_1 + 0,084 КС_5 + 0,704 КС_4 - 0,244 КС_2$
6	КТ ₁	$0,186 КС_7 + 0,508 КС_5 + 0,304 КС_1 + 0,559 КС_4 + 0,474 КС_3 + 0,279 КС_2$

Одним из наиболее информативных индексов является усовершенствованный индекс влажности EWDI (enhanced wetness difference index), который рассчитывается как разность полученных значений индекса влажности КТ₃ (компонента преобразования изображения) для каждого пиксела двух космических снимков одного и того же участка местности, сделанных через

какой-либо интервал времени. Значение усовершенствованного индекса влажности EWDI вычисляется с использованием метода главных компонент Каута–Томаса и алгоритма преобразования Tasseled Cap (Шовенгердт, 2010; Kauth, Thomas, 1976; Crist, Cicone, 1984; Schowengerdt, 2007).

Выполнение работ по анализу растровых изображений и расчету спектральной отражательной способности и индексов проведено в программном комплексе QGIS 3.14 на основании формул, представленных выше (см. табл. 2.1) и EWDI.

2.3.6 Анализ пространственно-временной динамики лесных насаждений с использованием данных дистанционного зондирования

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).

В ходе исследований были проведены анализ таксационных характеристик лесных насаждений в районе исследования и создание контуров пробных площадей (ПП) на космических снимках Landsat 1996 и 2002 г., которые были необходимы для анализа спектральной отражательной способности древостоев в месте расположения ПП и для расчета спектральных коэффициентов и индексов. Создание контуров пробных площадей и извлечение значений спектральных характеристик снимка выполнены в геоинформационной системе QGIS 3.14. При проведении статистического анализа использовали программный пакет STATISTICA 9.0 для расчета статистических параметров взаимосвязи характеристик спектральной отражательной способности древостоев с

параметрами состояния древостоев, полученными на основе данных наземных измерений. Степень зависимости определялась на основе величины коэффициента линейной корреляции (коэффициент корреляции Пирсона). Более информативным считали тот спектральный коэффициент или индекс, значение коэффициента корреляции которого с данными оценки состояния древостоев по наземным измерениям был выше.

Для проведения анализа изменения состояния лесных насаждений в районе исследований необходимо получение данных дистанционного зондирования, отвечающих следующим требованиям:

- отсутствие облачности и спектрального шума;
- пространственное и радиометрическое разрешение не менее 30 м/пиксел;
- близость дат съемки снимков, полученных в разные годы (в вегетационный период);
- данные должны быть получены с одного сенсора.

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.

Оценку влияния аэропромышленных загрязнений проводили в границах лесных насаждений на уровне выдела электронной лесной карты по результатам дешифрирования материалов дистанционного зондирования и материалов лесоустройства. С использованием созданной электронной лесной карты произведено разделение всех насаждений в районе исследования по преобладающей породе (сосна, ель, пихта, береза, осина).

На следующем этапе проводили расчет спектральных индексов влажности лесных насаждений по спутниковым данным на 1988, 1990, 1996, 2002, 2010, 2015, 2018, 2020 гг. Расчет выполняли по формулам, приведенным в таблице 2.1. На основе полученных данных произведен расчет картограмм улучшенного индекса влажности EWDI, отражающих состояние лесных насаждений для каждой древесной породы в 1990, 1996, 2002, 2010, 2015, 2018, 2020 гг.

При анализе динамики состояния лесных насаждений установлена шкала для оценки этих изменений, основанная на исходном состоянии древостоя (установленного по данным спектральной отражательной способности на 1988 г.). Шкала включает несколько градаций, отражающих динамику состояния древесного покрова:

- значительное улучшение состояния насаждения;
- улучшение состояния насаждения;
- ухудшение состояния насаждения;
- существенное ухудшение состояния насаждения.

2.4 Характеристика экспериментальных объектов и объем выполненных работ

Временной диапазон использованных в работе данных дистанционного зондирования составляет 32 года (таблица 2.2). 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).

В ходе снегомерных исследований было заложено 66 площадок для сбора данных о высоте снежного покрова, фитотоксичности и кислотности снеговой воды (таблица 2.3).

Таблица 2.2 – Данные дистанционного зондирования сенсора Landsat, используемые при анализе состояния лесных насаждений в районе исследований

№ п/п	Дата съемки	Разрешение снимка, м/пиксел	Разрешение радиометрическое, бит	Схема пролета	
				колонка	ряд
1	1988.06.07	30	8	164	020
2	1990.06.05	30	8	164	020
3	1996.06.29	30	8	164	020
4	2002.06.22	30	8	164	020
5	2010.06.28	30	8	164	020
6	2015.06.18	30	8	164	020
7	2018.06.26	30	8	164	020
8	2020.06.06	30	8	165	20

Таблица 2.3 – Объем выполненных работ

Вид работ	Количество
Отбор образцов снега для лабораторного анализа	198
Определение фитотоксичности снеговой воды	132
Определение кислотности снеговой воды	66
Создание векторной электронной карты лесных насаждений	1
Получение среднестатистических значений индекса EWDI для каждого лесного выдела электронной лесной карты	32049

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).

Экологическое зонирование лесов в районах антропогенного воздействия является важной задачей, решение которой имеет существенное значение как с точки зрения проведения фундаментальных исследований, так и их применения в практической деятельности. В результате такого зонирования можно определить текущее состояние лесных сообществ, оценить ущерб от воздействия промышленных выбросов и спланировать различные лесохозяйственные мероприятия для повышения продуктивности лесов и улучшения их экологических функций.

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.

Периодическая космическая съемка является одним из возможных источников данных для изучения изменения состояния лесных насаждений во времени. В данной работе были использованы результаты наземных обследований лесных насаждений, которые были проведены в районе исследований в середине 1990-х – начале 2000-х годов (Фомин, Шавнин, 2002; Папулов, 2003; Фомин, 2008, 2009; Фомин, Михайлович, 2013), данные космической съемки Landsat TM/Landsat ETM с 1990-х годов до настоящего времени (<http://glovis.usgs.gov>) и данные, характеризующие пространственные закономерности выпадения осадков на исследуемой территории (<https://rp5.ru/>), а также их уровень кислотности и общей фитотоксичности снеговой воды в начале XXI века.

3.1 Экологическое зонирование территории, прилегающей к Первоуральско-Ревдинскому промышленному узлу

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 синузий 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).

Данные комплексной оценки состояния древостоев по биометрическим параметрам (диаметр, высота, приросты по высоте и диаметру за последние 5 лет) были получены в результате прямых измерений на 119 пробных площадях. Из них 15 пробных площадей были переведены в постоянные (Папулов, 2003). На рисунке 3.1 приведена картосхема расположения 119 пробных площадей, заложенных в искусственных молодняках сосны в 1995–1996 гг.

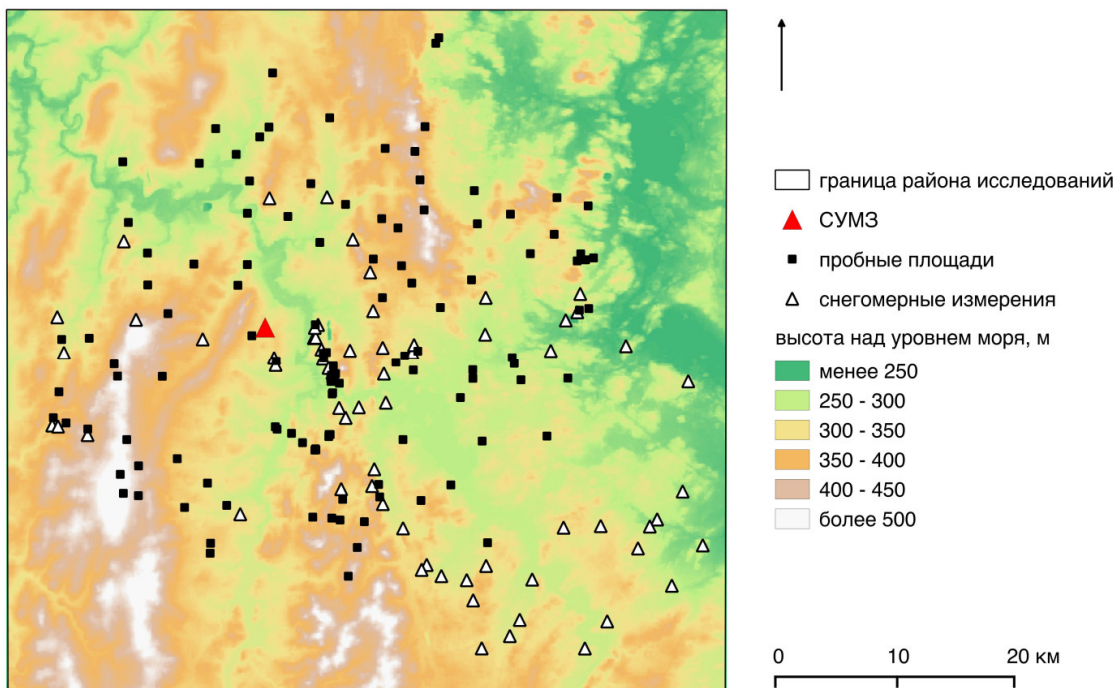


Рисунок 3.1 – Картосхема района исследования с расположением пробных площадей, заложенных для оценки состояния древостоев и снегомерных площадок

Зонирование района исследований по состоянию древостоев выполнено с помощью метода пространственной интерполяции «кригинг». На рисунке 3.2 приведены картосхема 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). Можно отметить, что в целом тенденция ухудшения состояния древостоев совпадает с тенденцией увеличения содержания меди в почве, за исключением

пробной площади, расположенной вблизи восточной границы исследуемого района. Низкий балл состояния вдоль восточной границы можно объяснить негативным влиянием города Екатеринбурга, западные районы которого примыкают к этой границе.

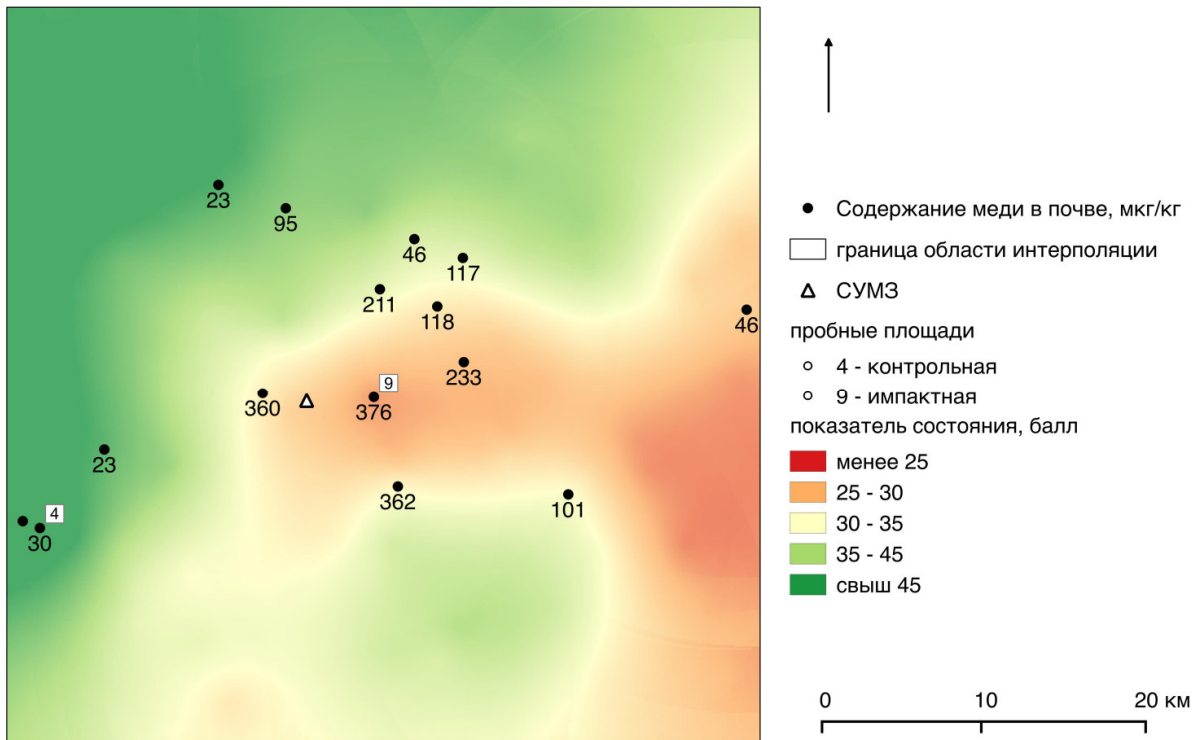


Рисунок 3.2 – Картосхема состояния лесных насаждений, созданная на основе данных комплексной оценки состояния сосновых молодняков искусственного происхождения, и содержание меди в почве постоянных пробных площадей во второй половине 1990-х – начале 2000-х годов (Папулов, 2003)

Картосхема, приведенная на рисунке 3.2, 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 классификации Ф. Н. Милькова под антропогенными ландшафтами понимаются как ландшафты, полностью созданные человеком, так и любые природные, в которых любой из компонентов был изменен, т. е. подвергся перестройке (коренному изменению). Таким компонентом может быть растительность или животный мир (Мильков, 1973).

Классификационная система Ф. Н. Милькова представлена следующими параметрами антропогенных комплексов: по их содержанию; глубине воздействия человека на природу; по генезису; по целенаправленности их возникновения; по длительности их существования и степени саморегулирования; по их хозяйственной ценности (Мильков, 1973).

В данной работе была использована классификация антропогенных ландшафтов по их содержанию (Мильков, 1973; Егоров, Козин, 2006). В ней выделяют следующие антропогенные комплексы: сельскохозяйственные, лесные, водные (водохранилища и пруды), промышленные, селитебные, дорожные, рекреационные и беллигеративные (связанные с военной деятельностью).

На рисунке 3.3 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 3.3, 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 беллигеративных ландшафтов, так и воздействия, обусловленные изменением компонентов окружающей среды, например загрязнением атмосферы промышленными выбросами предприятий Первоуральско-Ревдинского промышленного узла.

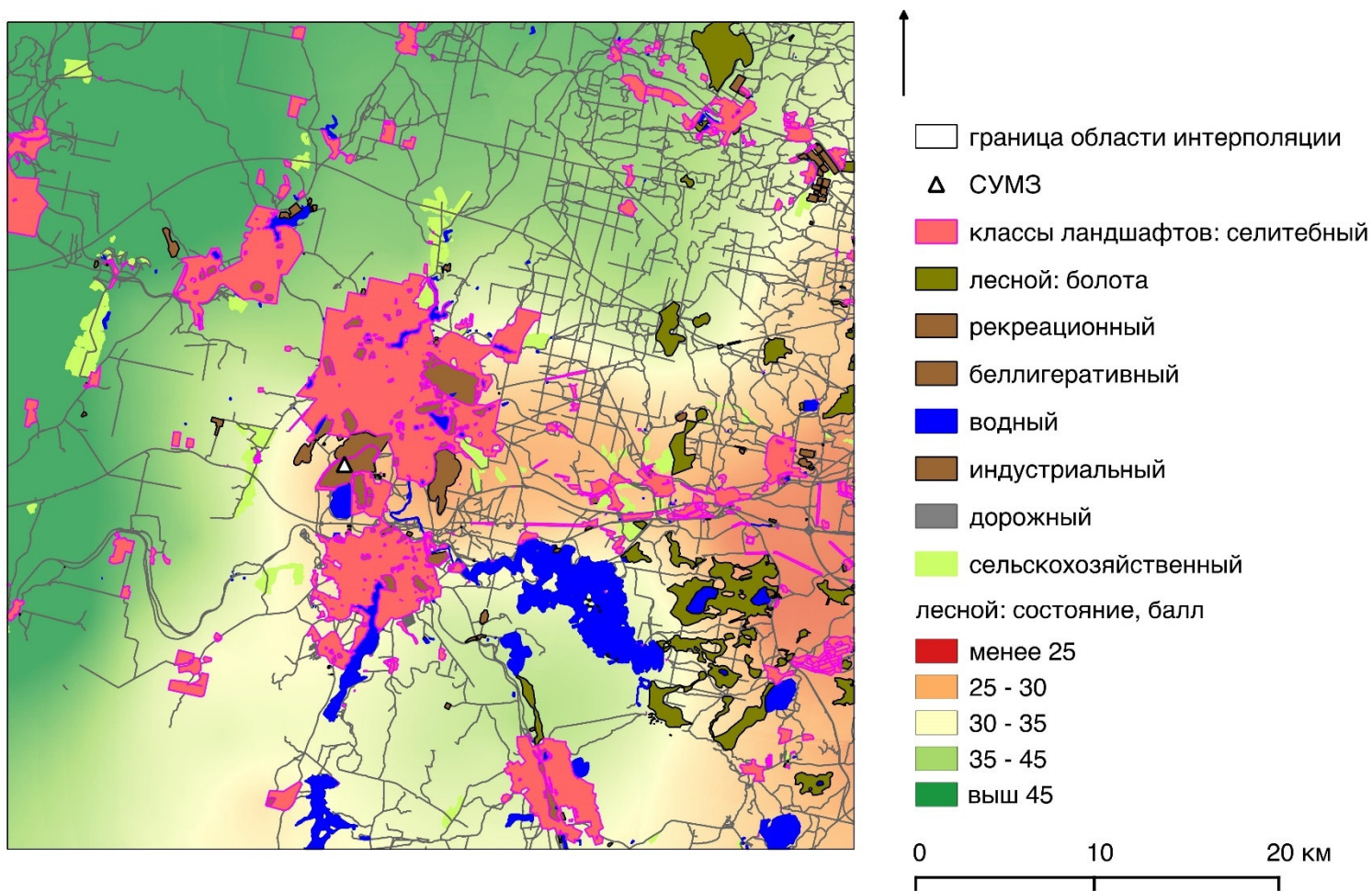


Рисунок 3.3 – Картосхема антропогенных ландшафтов района и состояния лесных насаждений на основе данных комплексной оценки состояния сосновых молодняков искусственного происхождения по морфометрическим характеристикам деревьев (диаметр, высота, прирост по диаметру и высоте за 5 лет)

3.2 Пространственные закономерности распределения осадков района исследований

Состояние сосновых древостоев, оценка которых была проведена с использованием комплекса морфометрических характеристик во второй половине 1990-х – начале 2000-х годов, отражает их состояние в условиях действия выбросов производства Среднеуральского медеплавильного завода, объем которых обусловлен технологией, которая была внедрена в производство в СССР.

В 2000-х годах на заводе началось внедрение новых технологий производства продукции и очистки выбросов (СУМЗ: история..., 2023). В начале 2010-х годов объем выбросов сократился. Изменение технологии позволило демонтировать большую часть труб, через которые выбросы поступали в атмосферу (СУМЗ: Общая информация..., 2023). Эти изменения должны оказать положительный эффект на состояние древесной растительности.

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.

На рисунке 2.3 приведена картосхема с обозначением местоположения 13 метеостанций, расположенных вдоль меридионального градиента.

На рисунке 3.4 приведен график, характеризующий высотное положение метеостанций.

На рисунках 3.5–3.7 приведены графики количества осадков, выпавших в зимний период года на 13 метеостанциях в разные годы в интервале с 1960-х до начала 2000-х годов. Анализ данных рисунках 3.5–3.7 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.

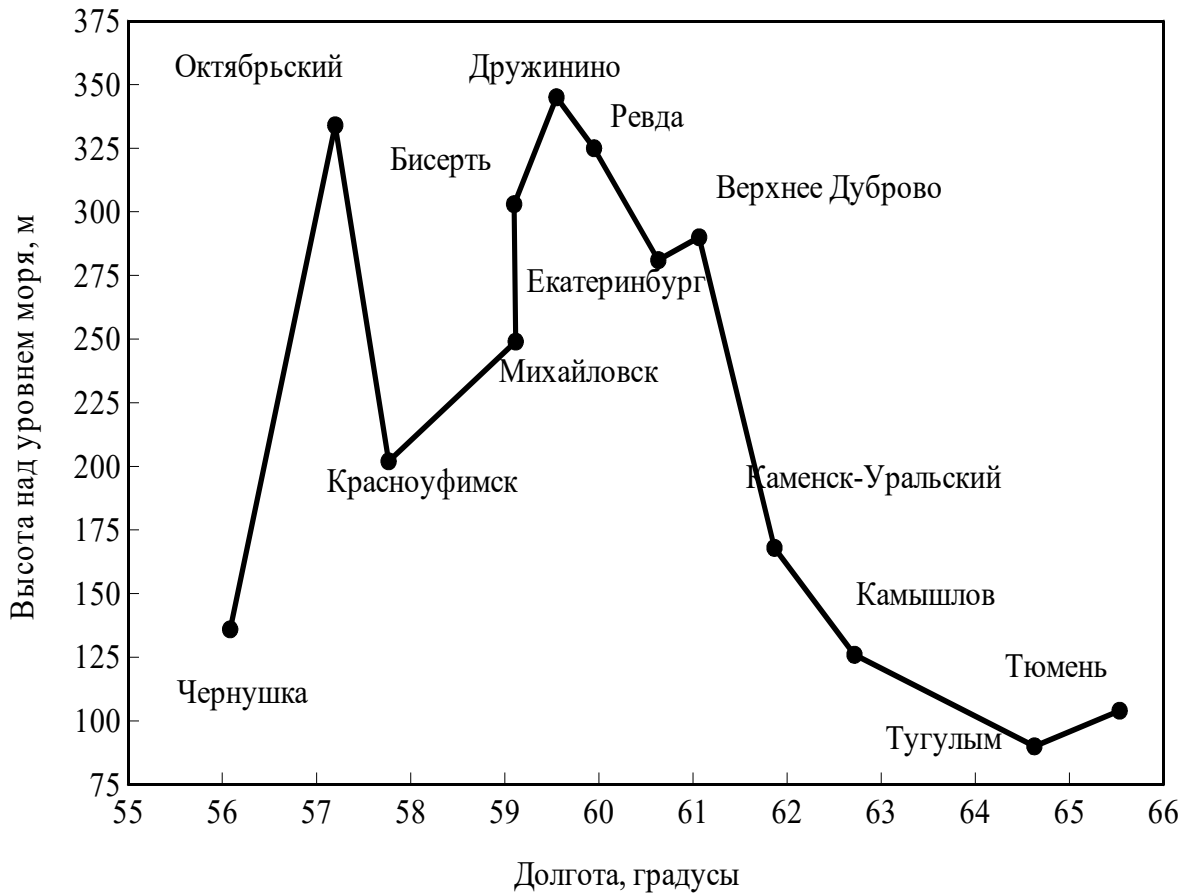
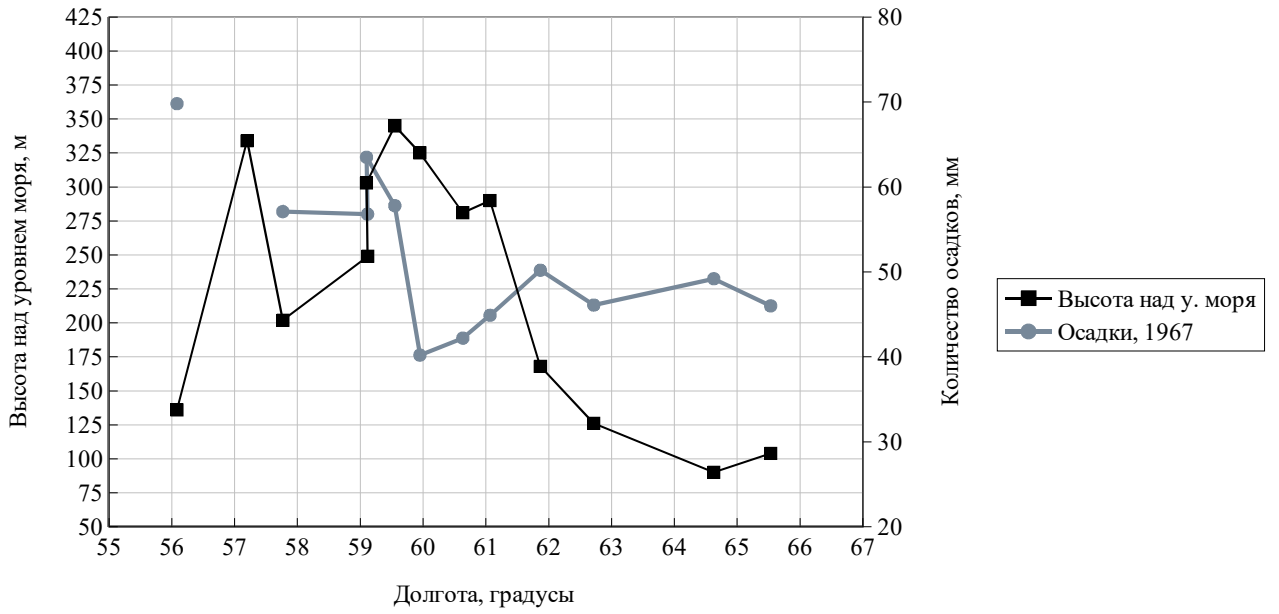


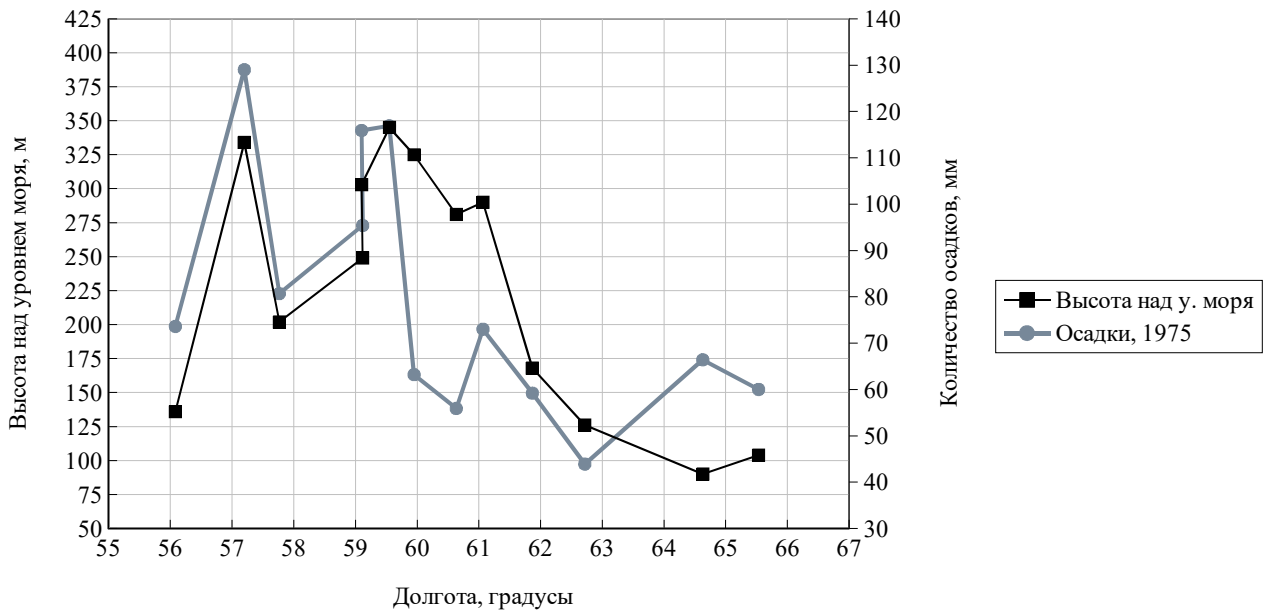
Рисунок 3.4 – График высотного положения метеостанций, расположенных вдоль меридионального градиента (см. рисунок 2.3)

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 3.1 обозначены места проведения измерения высоты снега и сбора образцов. На рисунке 3.8 представлена картосхема, характеризующая высоту снежного покрова в разных точках района исследований. На рисунке 3.9 отображены поверхности, характеризующие изменение высоты снежного покрова, запаса снега, запаса снеговой воды (данные приведены в приложении 1).

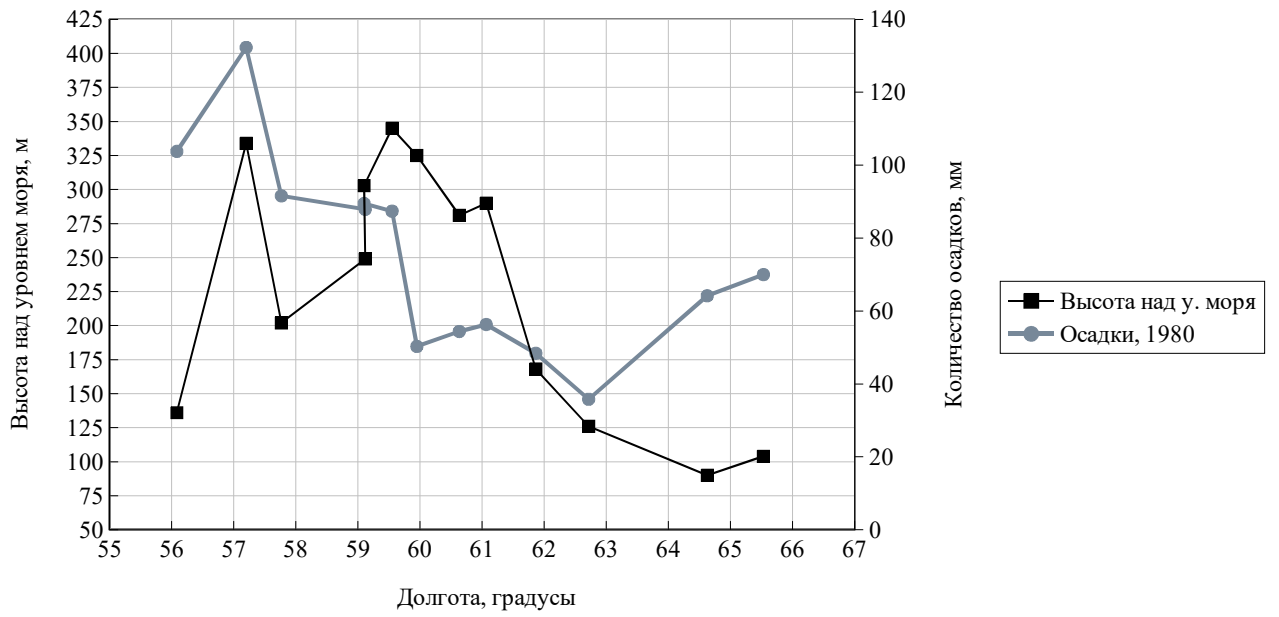


А

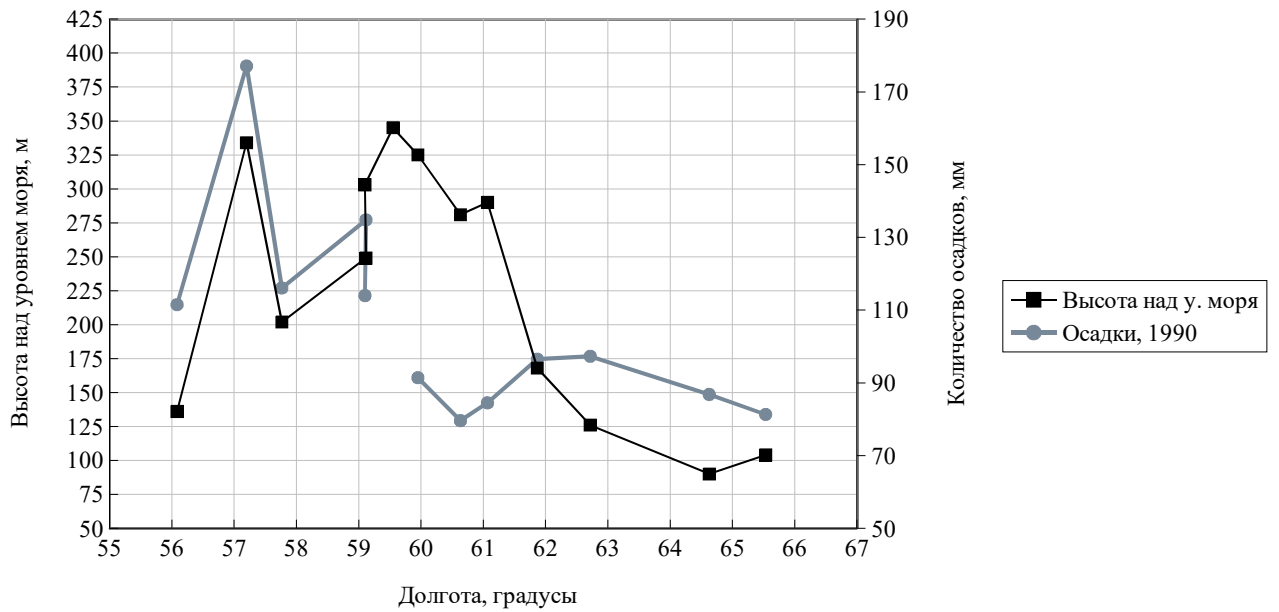


Б

Рисунок 3.5 – Графики высотного положения метеостанций, расположенных вдоль меридионального градиента, и количества осадков, выпавших в зимний период в 1967 (А) и 1975 (Б) гг.

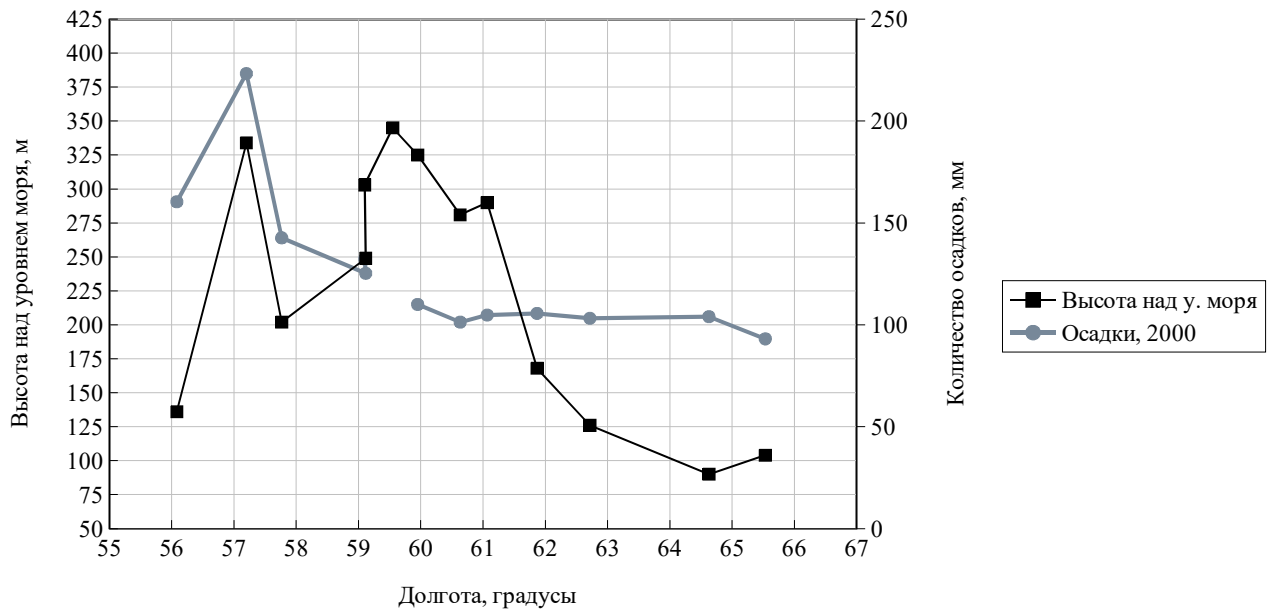


А

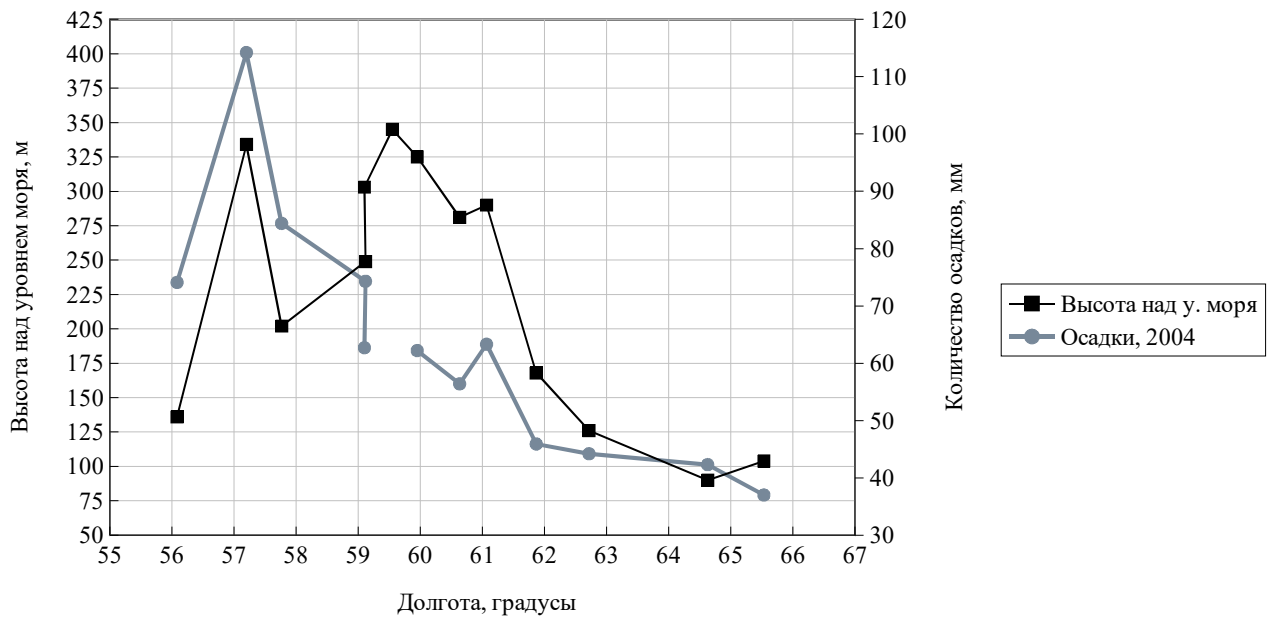


Б

Рисунок 3.6 – Графики высотного положения метеостанций, расположенных вдоль меридионального градиента, и количества осадков, выпавших в зимний период в 1980 (А) и 1990 (Б) гг.



А



Б

Рисунок 3.7 – Графики высотного положения метеостанций, расположенных вдоль меридионального градиента, и количества осадков, выпавших в зимний период в 2000 (А) и 2004 (Б) гг.

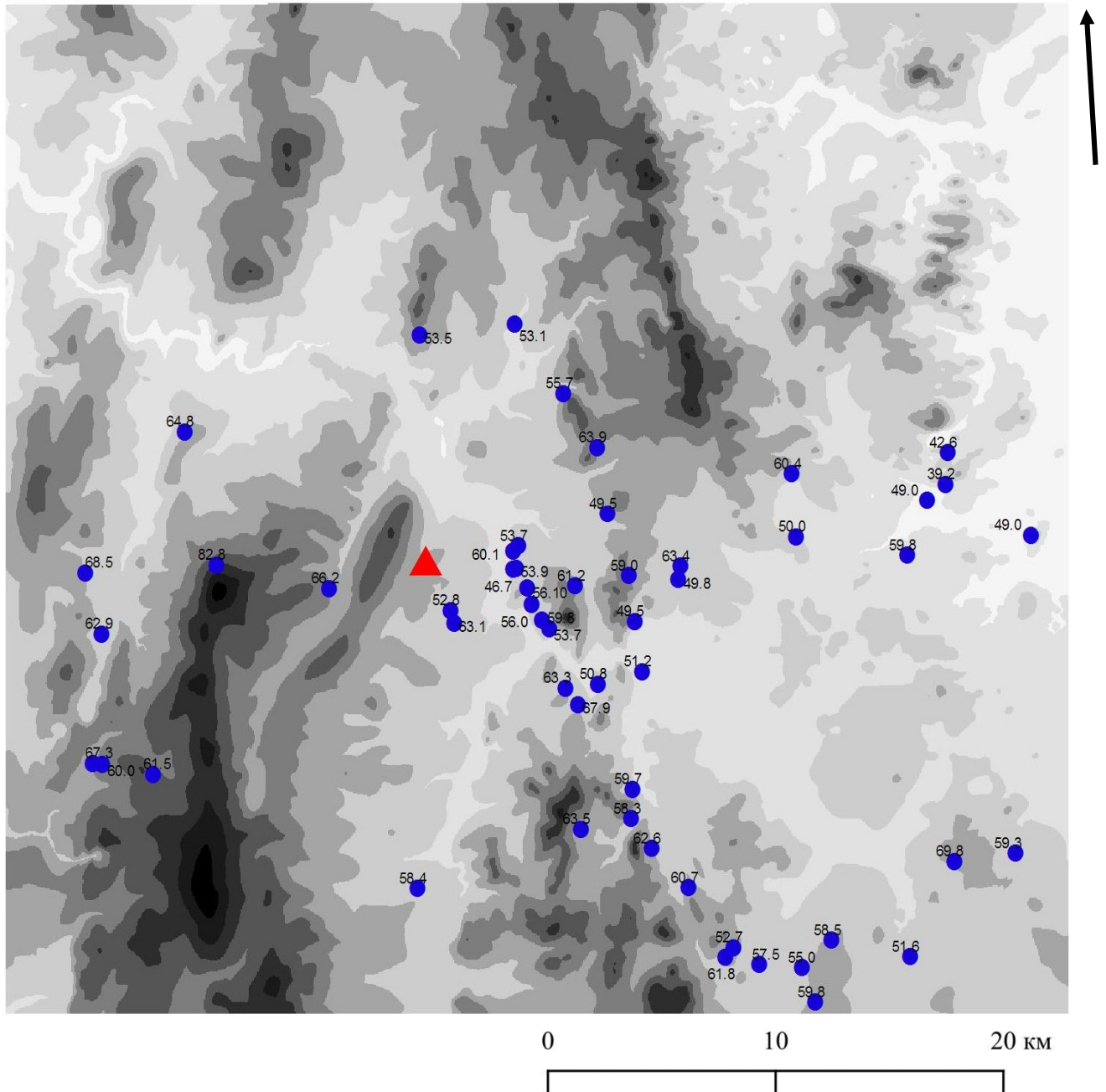


Рисунок 3.8 – Картосхема района исследований, составленная на основе цифровой модели рельефа) и данных снегомерных наблюдений.

Точками синего цвета обозначены места измерения высоты снежного покрова, числовыми значениями – высота снега, см. Изменение интенсивности окраски от светло-серого к темно-серому означает увеличение высоты местности над уровнем моря

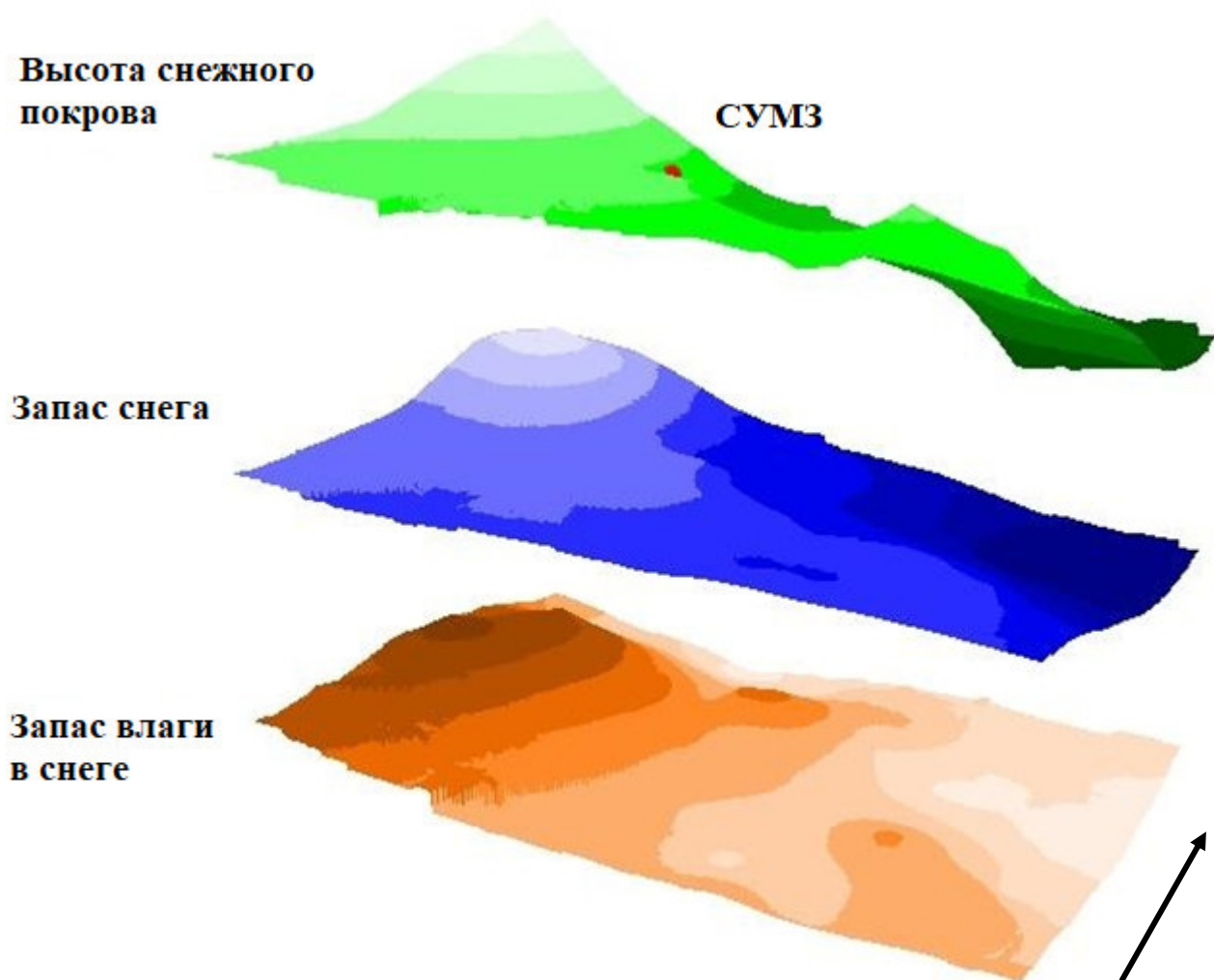


Рисунок 3.9 – Поверхности тренда, характеризующие изменение величин следующих показателей: высота снежного покрова, запас снега, запаса снеговой воды. Поверхности построены с использованием метода пространственной интерполяции «кригинг» по данным прямых измерений для визуализации общей тенденции изменения значений показателей. Границы области интерполяции определены координатами местоположения снегомерных площадок

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 3.10). 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 (рисунок 3.11) 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. Екатеринбургу) 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.

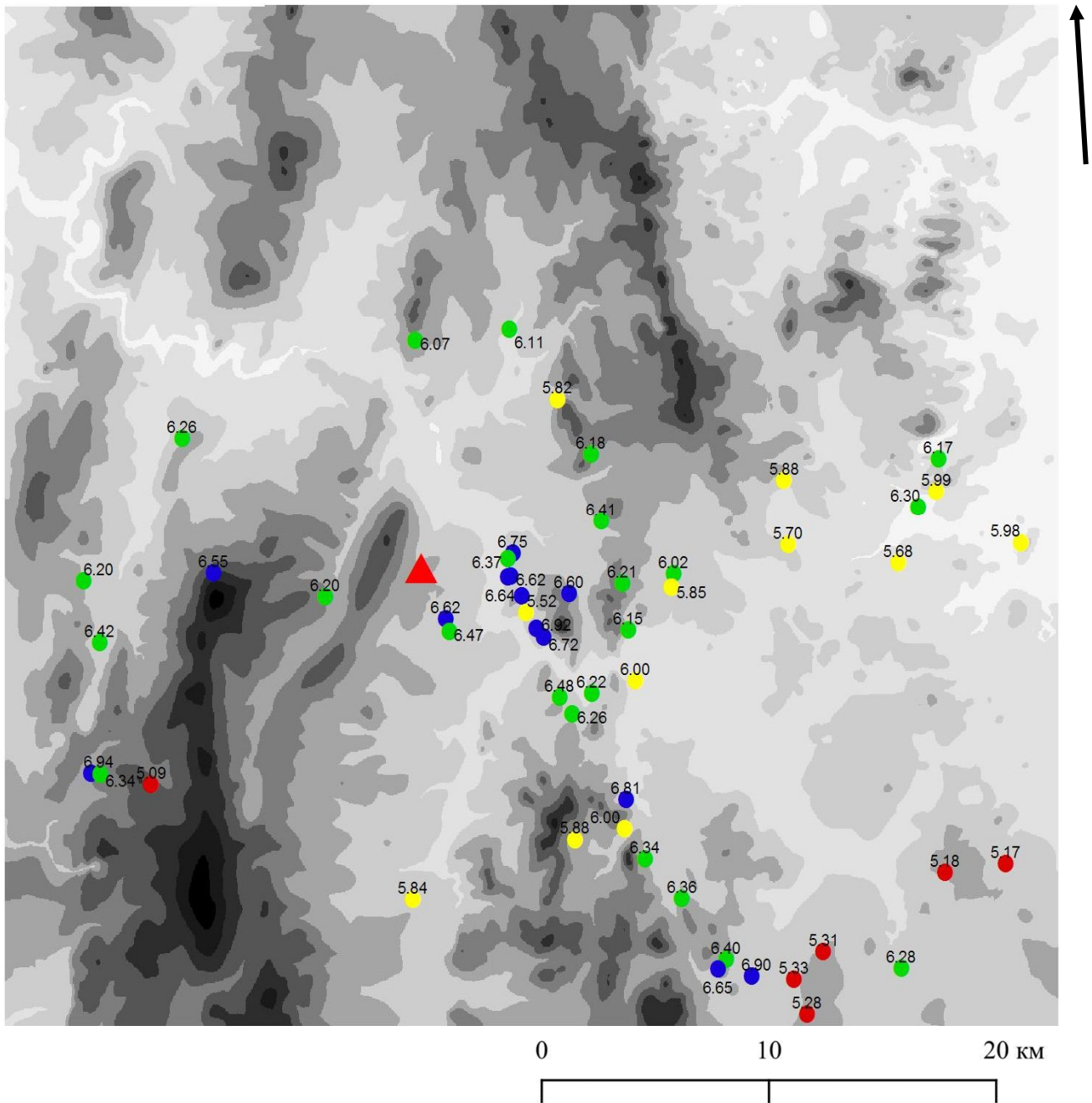


Рисунок 3.10 – Картограмма района исследований, составленная на основе цифровой модели рельефа и данных изменений кислотности снеговой воды.

Точками разного цвета обозначены места сбора образцов, числовыми значениями – рН. Изменение интенсивности окраски от светло-серого к темно-серому означает увеличение высоты местности над уровнем моря

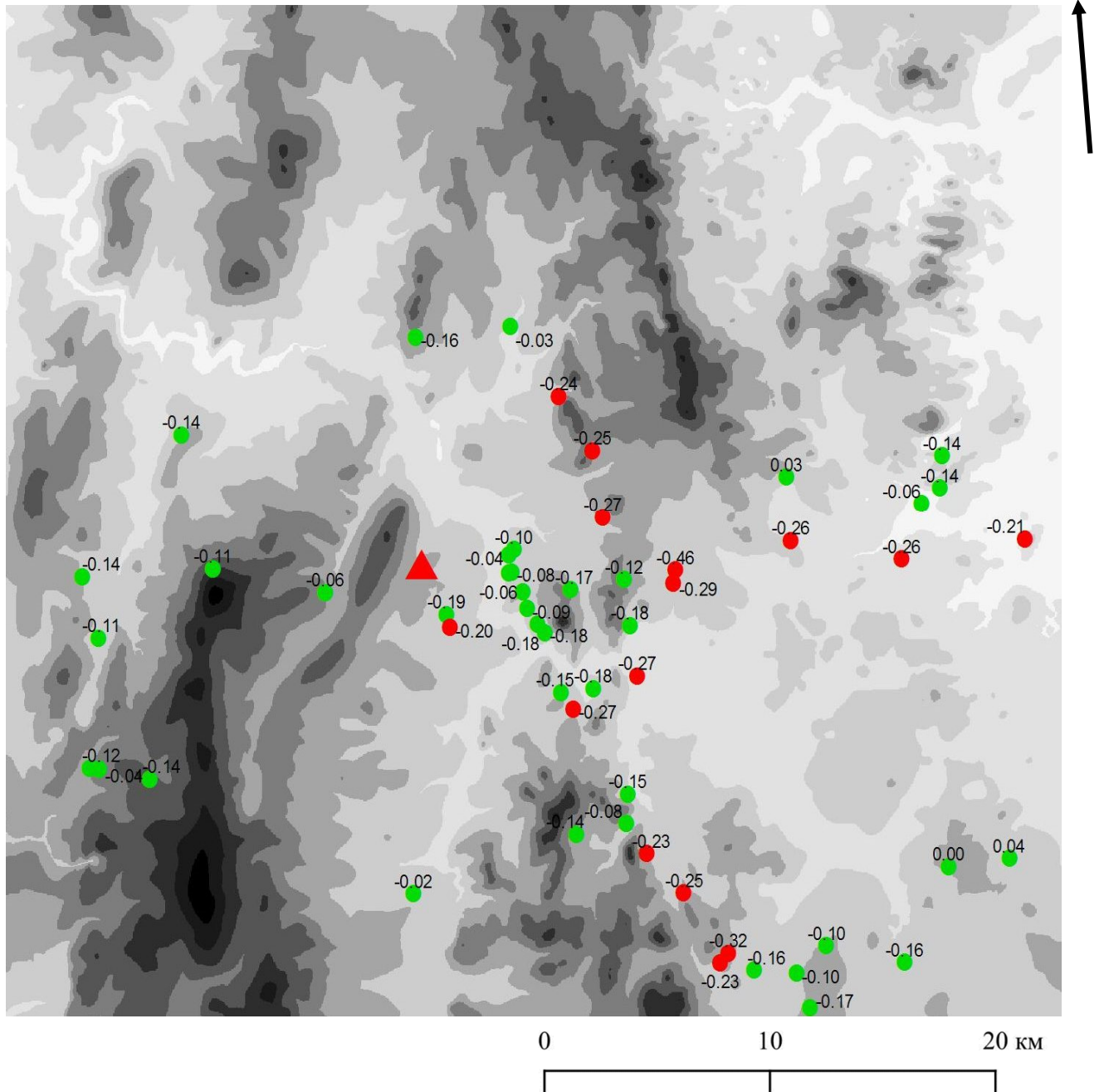


Рисунок 3.11 – Картосхема района исследований, составленная на основе цифровой модели рельефа и данных фитотоксичности снеговой воды. Точками разного цвета обозначены места сбора образцов, цифрами – значения коэффициента фитотоксичности. Точками красного цвета обозначены места сбора, в которых снеговая вода является более токсичной по сравнению с таковой в точках, обозначенными зеленым цветом. Изменение интенсивности окраски от светло-серого к темно-серому означает увеличение высоты местности над уровнем моря

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).

На рисунке 4.1 приведена картосхема, на которой представлены лесные насаждения района исследований, окрашенные по преобладающей древесной породе, а также населенные пункты и дорожная сеть.

На рисунке 4.1 видно, 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.

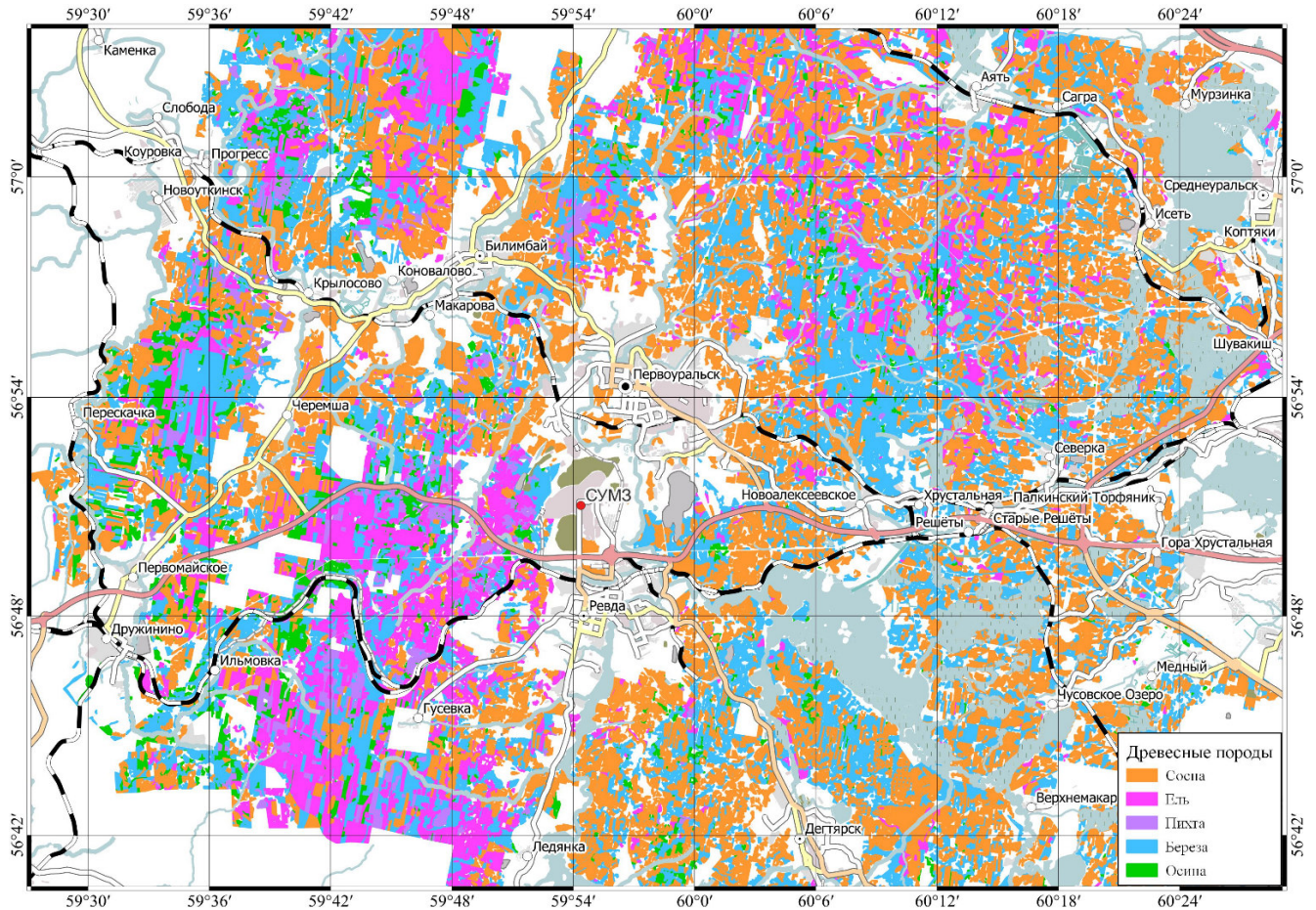


Рисунок 4.1 – Картосхема населенных пунктов, дорожной сети и лесных насаждений района исследований

В таблице 4.1 приведены значения обобщенного показателя состояния (ОПС), рассчитанного на основе морфометрических характеристик древостоев на 15 постоянных пробных площадях (Фомин, 1998), и значения усовершенствованного индекса влажности EWDI. Коэффициент корреляции Пирсона равен -0.911 на уровне значимости менее 0.05. Это свидетельствует о высоком уровне линейной зависимости между значениями ОПС и индекса EWDI. Отрицательная величина коэффициента корреляции свидетельствует об обратной зависимости значений показателей. Улучшение состояния характеризуется увеличением значений обобщенного показателя состояния и, соответственно, уменьшением значений индекса EWDI.

Таблица 4.1 – Значения индекса EWDI (отн. ед.), обобщенного показателя состояния (балл) лесных насаждений на пробных площадях

№ ПП	ОПС 1999 год	EWDI 1996 год
1	28	-22,23
2	47	-34,33
3	36	-27,13
4	62	-55,33
5	51	-36,04
6	18	-10,96
7	40	-27,96
8	54	-41,17
9	5	-15,09
10	39	-38,68
11	26	-28,86
12	34	-23,06
13	55	-52,27
14	63	-52,29
15	48	-34,68

Примечание: жирным шрифтом выделены контрольная пробная площадь (ПП4) и пробная площадь в импактной зоне вблизи СУМЗа (ПП9).

На рисунке 4.2 приведен график зависимости балла состояния древостоев на пробных площадях от значений EWDI. Представленные на данном рисунке график и уравнение позволяют количественно оценить значения EWDI для конкретного балла состояния.

В таблице 4.2 приведены статистические характеристики, рассчитанные на основе значений индекса EWDI за 30-летний период для всего района исследований.

Таблица 4.2 – Статистические значения усовершенствованного индекса влажности района исследования

Наименование	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Минимальное значение	-499,28	-501,44	-504,88	-624,91	-564,44	-599,69	-599,42
Максимальное значение	599,62	443,36	1026,65	1111,22	2223,92	1729,19	2817,82
Диапазон	1098,9	944,8	1531,54	1736,13	2788,36	2328,88	3417,24
Среднее значение	-5,96	-12,31	-16,65	-10,7	-24,92	-18,96	-24,98
Стандартное отклонение	35,84	33,67	35,7	37,94	43,28	42,4	38,32
Ошибка среднего	0,007	0,007	0,007	0,008	0,009	0,008	0,008

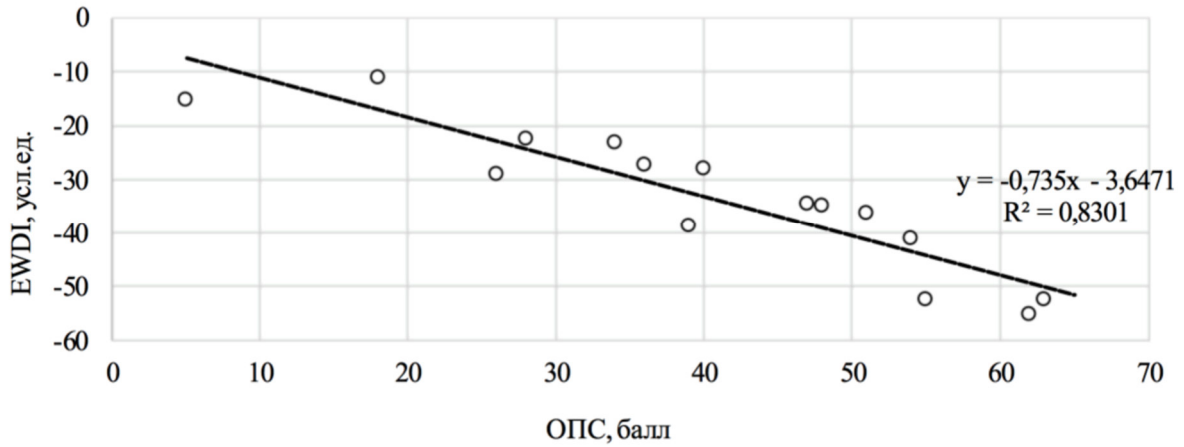


Рисунок 4.2 – Зависимость значений индекса EWDI (1996 г.) от величин обобщенного показателя состояния сосновых древостоев на пробных площадях в 1995–1996 гг.

На рисунке 4.3 приведен график изменения среднего значения индекса EWDI за период с 1990 по 2020 гг., линия тренда и параметры уравнения линейной зависимости.

Данные, представленные в таблице 4.1 и на рисунке 4.3, свидетельствуют о снижении значений индекса EWDI, а значит, улучшении состояния лесных насаждений на всей исследуемой территории.

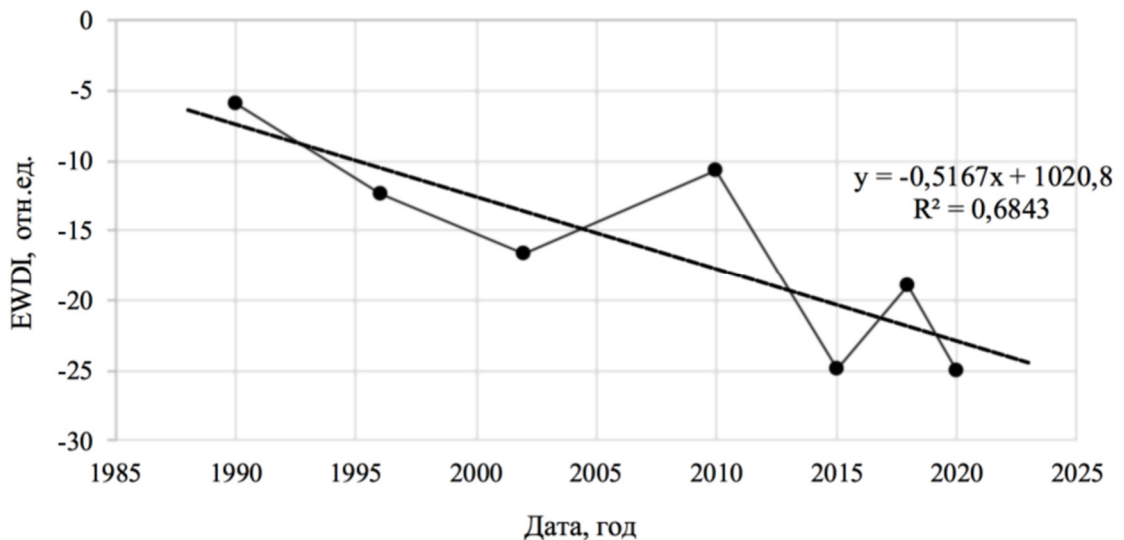


Рисунок 4.3 – График зависимости среднего значения индекса EWDI, линия тренда с параметрами уравнения линейной зависимости за период с 1990 по 2020 гг., рассчитанного для всего района исследований

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. На рисунке 4.4 и 4.5 приведены графики зависимости количества осадков и средней температуры воздуха за год и май – август на метеостанции Екатеринбург, построенные на основе данных архива ВНИИ Гидрометеорологической информации – мирового центра данных (<http://aisori-m.meteo.ru/>). Выбор данной метеостанции для оценки тренда изменений показателей был обусловлен тем, что она находится вблизи района исследований и для нее есть набор данных до 2020 г. включительно.

На рисунке 4.4 можно видеть тренд снижения количества осадков с 1998 по 2013 гг. с локальным минимумом с 2010 по 2013 гг. На рисунке 4.5 для средних значений температуры воздуха за год и период май – август и временной отрезок с середины 1990-х до 2020 гг. наблюдается незначительно выраженный тренд увеличения значений показателя за примерно полувековой период наблюдений.

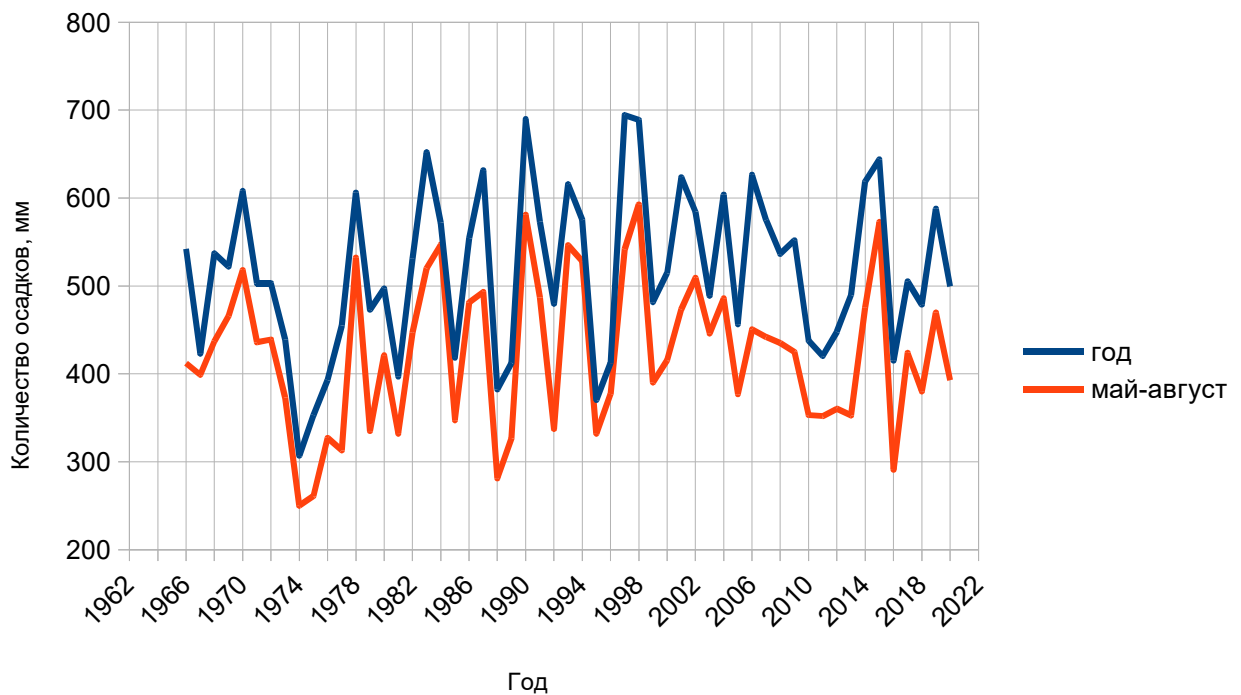


Рисунок 4.4 – Графики хода количества осадков на метеостанции Екатеринбург с 1966 по 2019 гг. за год и период с мая по август включительно

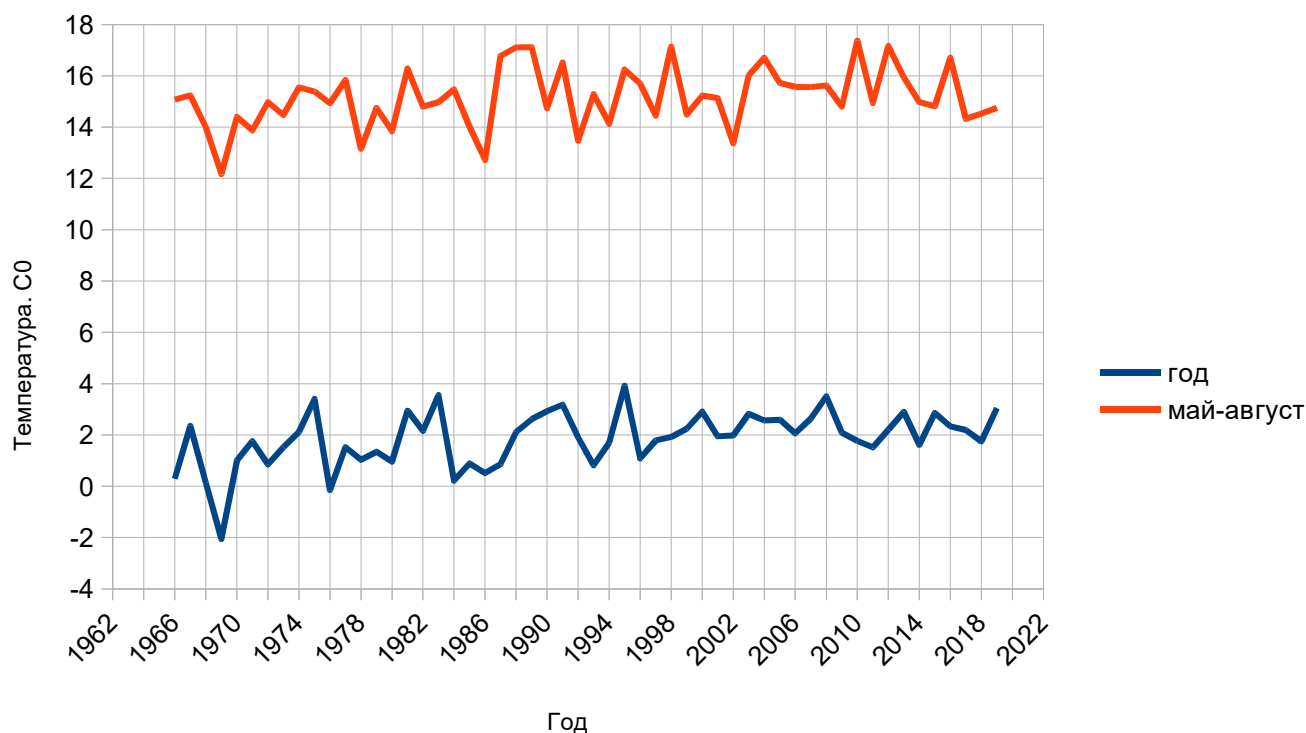


Рисунок 4.5 – Графики хода средних значений температуры воздуха на метеостанции Екатеринбург с 1966 по 2019 гг. за год и период с мая по август включительно

На данном рисунке можно видеть локальные максимумы средних величин температуры за май – август в 1998, 2010, 2012 и 2016 гг. и ярко выраженный минимум значений данного показателя в 2002 г.

На рисунке 4.6 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.

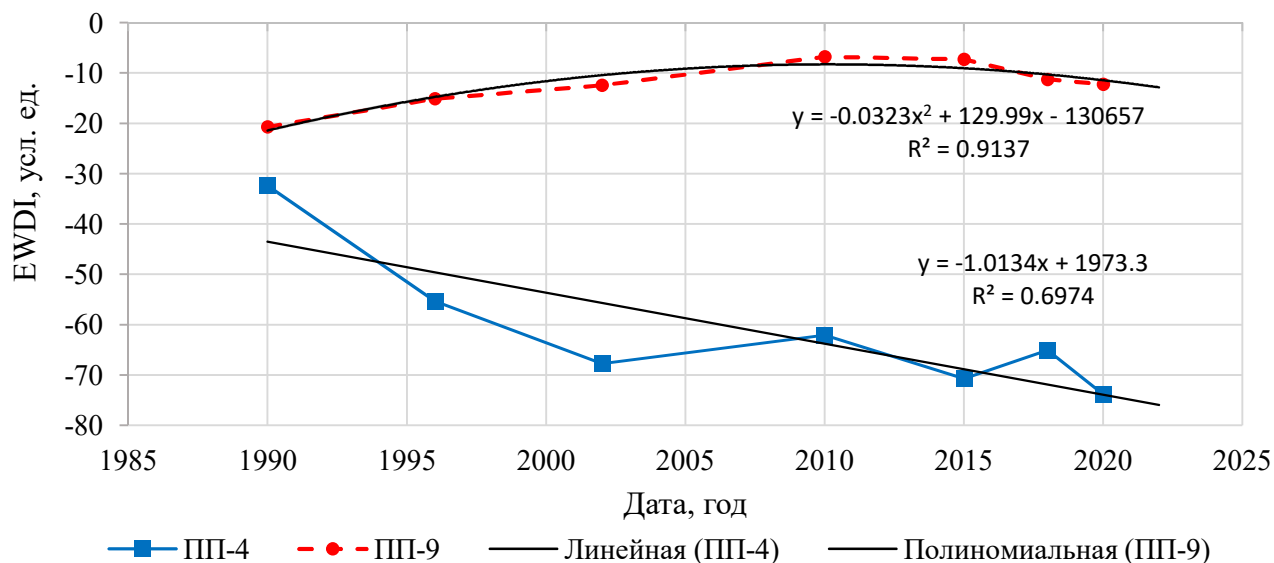


Рисунок 4.6 – Изменение значений индекса EWDI контрольной ПП-4 (фоновая зона) и импактной ПП-9 (импактная зона) пробных площадей за период с 1990 по 2020 гг.

С приближением к источнику аэропромышленных выбросов происходит угнетение лесных насаждений, которое может выражаться в снижении густоты, сомкнутости полога, уменьшении видового разнообразия живого напочвенного покрова, при этом характер и степень этих изменений могут различаться в зависимости от зоны нагрузки (Воробейчик, 2017). 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).

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 таблицах 4.3 и 4.4 приведены статистические показатели значений

индекса EWDI для сосновых и березовых насаждений в разных зонах аэропромышленного загрязнения за период с 1990 по 2020 гг. На рисунках 4.7 и 4.8 приведены графики зависимости изменения значений улучшенного индекса влажности по зонам в разные годы для сосновых и березовых древостоев за исследуемый период. Для еловых, пихтовых и осиновых аналогичные таблицы и графики приведены в приложениях 2–7.

Таблица 4.3 – Статистические показатели усовершенствованного индекса влажности EWDI для сосновых насаждений в зонах на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода

Параметр	Значение показателя по годам						
	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Импактная 1 км зона							
Количество участков	18	18	18	18	18	18	18
Минимальное значение	-32,22	-53,77	-74,00	-100,73	-143,49	-147,26	-144,84
Максимальное значение	5,00	20,91	17,51	23,08	-2,42	-7,30	-9,22
Среднее значение	-14,41	-12,44	-21,13	-17,79	-36,76	-38,26	-40,18
Стандартное отклонение	10,48	11,65	20,87	18,78	32,15	31,81	31,5
Коэффициент вариации	-0,73	-0,94	-0,99	-1,06	-0,87	-0,83	-0,78
Ошибка среднего	2,47	2,75	4,92	4,43	7,58	7,50	7,42
Импактная 2 км зона							
Количество участков	43	43	43	43	43	43	43
Минимальное значение	-61,54	-57,40	-80,42	-83,70	-105,29	-101,48	-99,79
Максимальное значение	6,79	7,84	13,33	17,45	13,51	10,15	1,46
Среднее значение	-15,20	-12,32	-17,81	-13,84	-29,38	-27,61	-27,60
Стандартное отклонение	12,14	11,5	17,76	10,38	22,77	21,17	21,63
Коэффициент вариации	-0,8	-0,93	-1,00	-0,75	-0,78	-0,77	-0,78
Ошибка среднего	1,85	1,75	2,71	1,58	3,47	3,23	3,30
Буферная 4 км зона							
Количество участков	87	87	87	87	87	87	87
Минимальное значение	-44,47	-64,09	-73,33	-86,31	-112,69	-107,41	-110,41
Максимальное значение	12,53	37,86	44,75	33,13	12,68	30,38	25,56
Среднее значение	-10,37	-9,53	-13,19	-10,11	-25,81	-24,24	-24,59
Стандартное отклонение	8,81	8,04	12,2	9,97	15,03	15,96	16,76
Коэффициент вариации	-0,85	-0,84	-0,92	-0,99	-0,58	-0,66	-0,68
Ошибка среднего	0,94	0,86	1,31	1,07	1,61	1,71	1,80
Буферная 7 км зона							
Количество участков	303	303	303	303	303	303	303
Минимальное значение	-41,48	-50,51	-55,54	-68,37	-89,25	-87,87	-94,38
Максимальное значение	22,44	89,92	62,28	35,23	37,00	61,19	33,70
Среднее значение	-7,49	-7,67	-10,58	-8,88	-20,83	-18,80	-21,34

Параметр	Значение показателя по годам						
	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Стандартное отклонение	7,28	6,79	9,64	7,92	15,16	14,75	14,44
Коэффициент вариации	-0,97	-0,89	-0,91	-0,89	-0,73	-0,78	-0,68
Ошибка среднего	0,42	0,39	0,55	0,45	0,87	0,85	0,83
Фоновая 30 км зона							
Количество участков	9730	9730	9730	9730	9730	9730	9730
Минимальное значение	-138,79	-113,61	-158,86	-159,56	-199,02	-184,09	-188,76
Максимальное значение	112,14	135,16	123,10	137,87	139,15	148,76	207,25
Среднее значение	-3,94	-9,25	-13,15	-8,15	-19,13	-14,87	-18,71
Стандартное отклонение	2,98	8,91	12,65	7,98	18,5	13,7	17,98
Коэффициент вариации	-0,76	-0,96	-0,96	-0,98	-0,97	-0,92	-0,96
Ошибка среднего	0,03	0,09	0,13	0,08	0,19	0,14	0,18

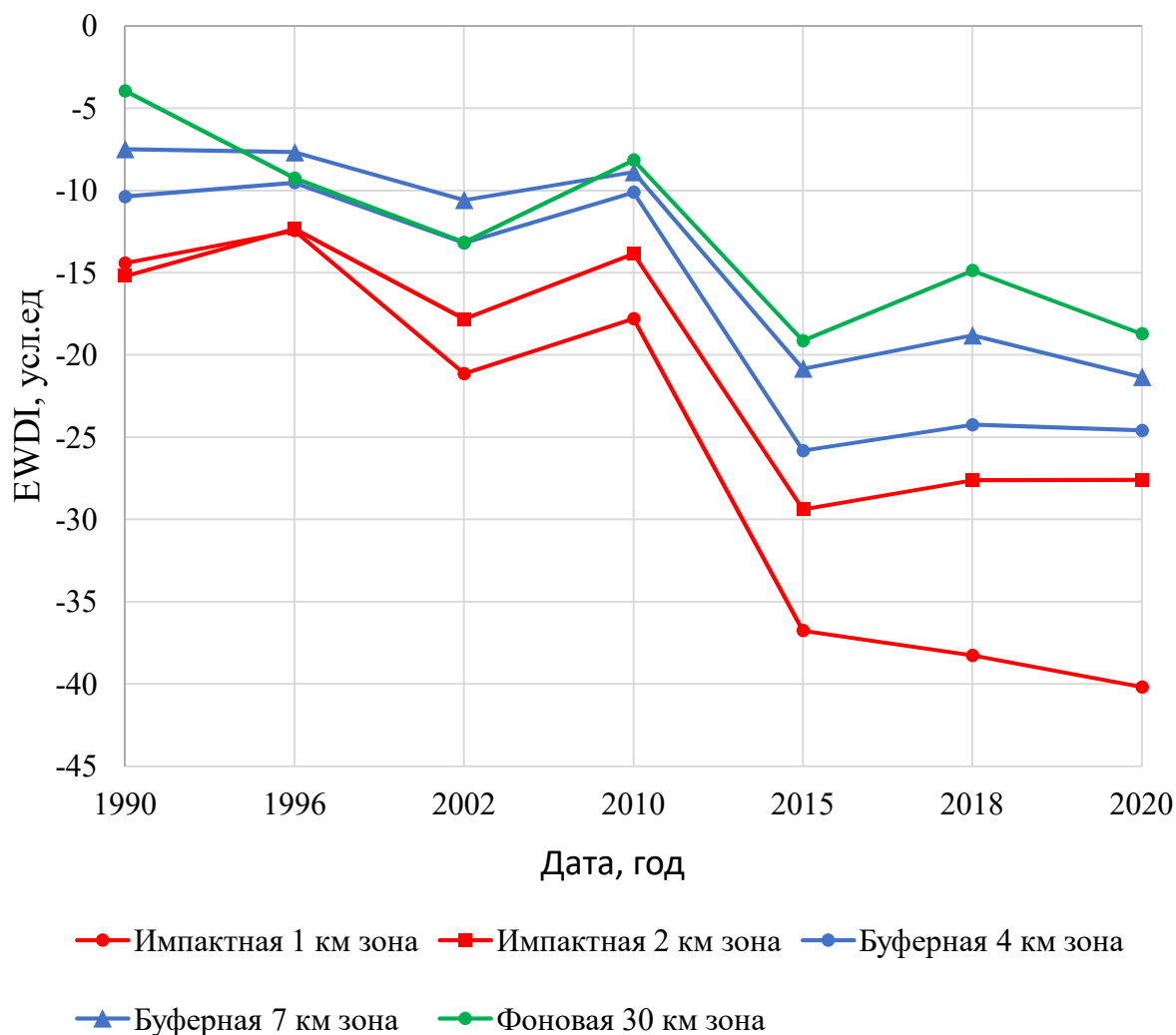


Рисунок 4.7 – Графики изменения значений индекса EWDI для сосновых насаждений в разных зонах аэропромышленного загрязнения

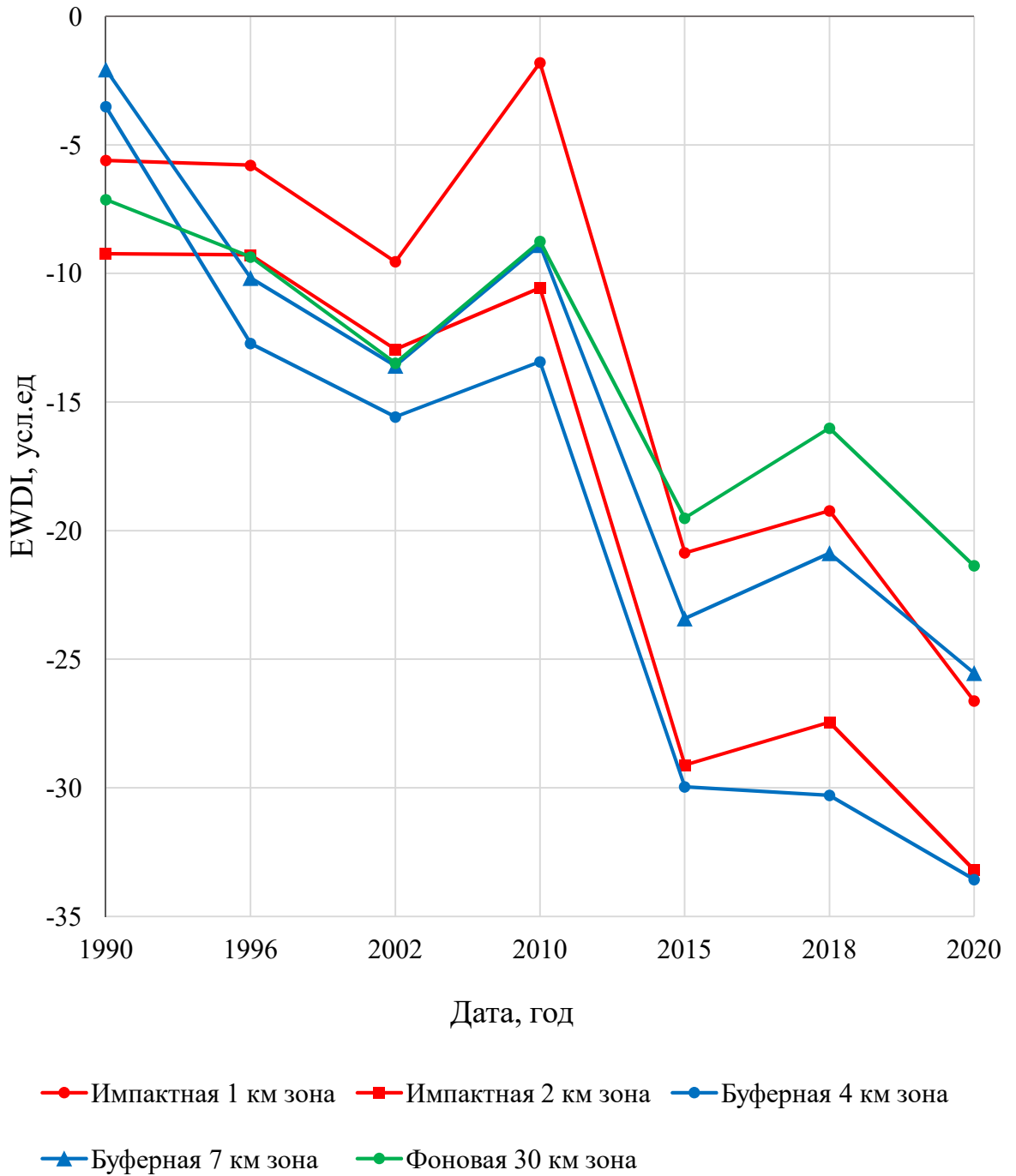


Рисунок 4.8 – Графики изменения значений индекса EWDI для березовых насаждений в разных зонах аэропромышленного загрязнения

Таблица 4.4 – Статистические показатели усовершенствованного индекса влажности EWDI для березовых насаждений в зонах на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода

Параметр	Значение показателя по годам						
	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Импактная 1 км зона							
Количество участков	62	62	62	62	62	62	62
Минимальное значение	-72,61	-75,38	-94,68	-96,13	-116,77	-98,91	-100,87
Максимальное значение	3,76	26,80	36,35	79,77	32,91	53,13	55,88
Среднее значение	-5,60	-5,79	-9,54	-1,80	-20,86	-19,22	-26,62
Стандартное отклонение	4,19	9,06	13,22	2,72	32,63	31,11	32,34
Коэффициент вариации	-0,75	-1,56	-1,39	-1,51	-1,56	-1,62	-1,21
Ошибка среднего	0,53	1,15	1,68	0,35	4,14	3,95	4,11
Импактная 2 км зона							
Количество участков	61	61	61	61	61	61	61
Минимальное значение	-41,43	-50,52	-53,78	-59,19	-75,54	-77,95	-81,99
Максимальное значение	59,30	55,11	36,38	42,80	28,40	22,69	21,67
Среднее значение	-9,23	-9,28	-12,95	-10,55	-29,11	-27,44	-33,19
Стандартное отклонение	9,0	10,58	11,25	10,9	20,43	19,24	20,03
Коэффициент вариации	-0,97	-1,14	-0,87	-1,03	-0,7	-0,7	-0,6
Ошибка среднего	1,15	1,35	1,44	1,40	2,62	2,46	2,56
Буферная 4 км зона							
Количество участков	157	157	157	155	157	157	157
Минимальное значение	-113,77	-128,77	-68,74	-81,00	-95,83	-139,89	-112,75
Максимальное значение	61,36	46,74	40,59	42,77	29,00	16,27	11,72
Среднее значение	-3,51	-12,72	-15,57	-13,43	-29,96	-30,29	-33,56
Стандартное отклонение	3,11	18,16	17,02	17	17,11	18,2	17,13
Коэффициент вариации	-0,89	-1,43	-1,09	-1,27	-0,57	-0,6	-0,51
Ошибка среднего	0,25	1,45	1,36	1,37	1,37	1,45	1,37
Буферная 7 км зона							
Количество участков	425	425	425	424	425	425	425
Минимальное значение	-72,32	-100,04	-62,95	-97,59	-124,39	-146,80	-143,13
Максимальное значение	50,72	45,09	29,04	94,73	77,76	52,91	15,32
Среднее значение	-2,06	-10,17	-13,58	-8,89	-23,41	-20,87	-25,53
Стандартное отклонение	1,95	12,09	10,74	15,55	15,69	15,86	15,86
Коэффициент вариации	-0,94	-1,19	-0,79	-1,75	-0,67	-0,76	-0,62
Ошибка среднего	0,09	0,59	0,52	0,76	0,76	0,77	0,77
Фоновая 30 км зона							
Количество участков	13655	13655	13655	13655	13655	13655	13655
Минимальное значение	-209,45	-241,23	-182,92	-163,67	-230,09	-218,09	-175,27
Максимальное значение	98,02	95,25	111,34	160,59	141,11	136,91	125,23
Среднее значение	-7,12	-9,35	-13,48	-8,75	-19,51	-16,01	-21,36
Стандартное отклонение	4,31	8,86	13,6	8,95	18,22	19,44	15,34
Коэффициент вариации	-0,61	-0,95	-1,01	-1,02	-0,93	-1,21	-0,72
Ошибка среднего	0,04	0,08	0,12	0,08	0,16	0,17	0,13

Данные таблиц 4.3–4.4 и рисунков 4.7–4.8 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 (см. рисунки 4.4 и 4.5). 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 (приложения 2–7). Установленные факты улучшения состояния лесных насаждений сразу после уменьшения количества выбросов согласовывается с ранее проведенными исследованиями в данном районе (Воробейчик, Кайгородова, 2017).

На рисунках 4.9 и 4.10 представлены картосхемы состояния сосновых насаждений в 1996 и 2020 гг., а на рисунках 4.11–4.12 – насаждений с преобладанием в составе березы в эти же годы. Картосхемы состояния этих насаждений в другие годы приведены в приложениях 8–15. Картосхемы состояния еловых, пихтовых и осиновых насаждений за весь исследуемый период представлены в приложениях 16–33.

Картосхемы, приведенные на рисунках 4.9–4.12 подтверждают описанные выше закономерности изменения состояния сосновых и березовых насаждений на исследуемой территории. На данных рисунках можно видеть значительные по площади области улучшения состояния лесных насаждений с преобладанием в составе сосны и березы. При этом часть областей с локальным ухудшением состояния, как правило, находится вблизи селитебных зон.

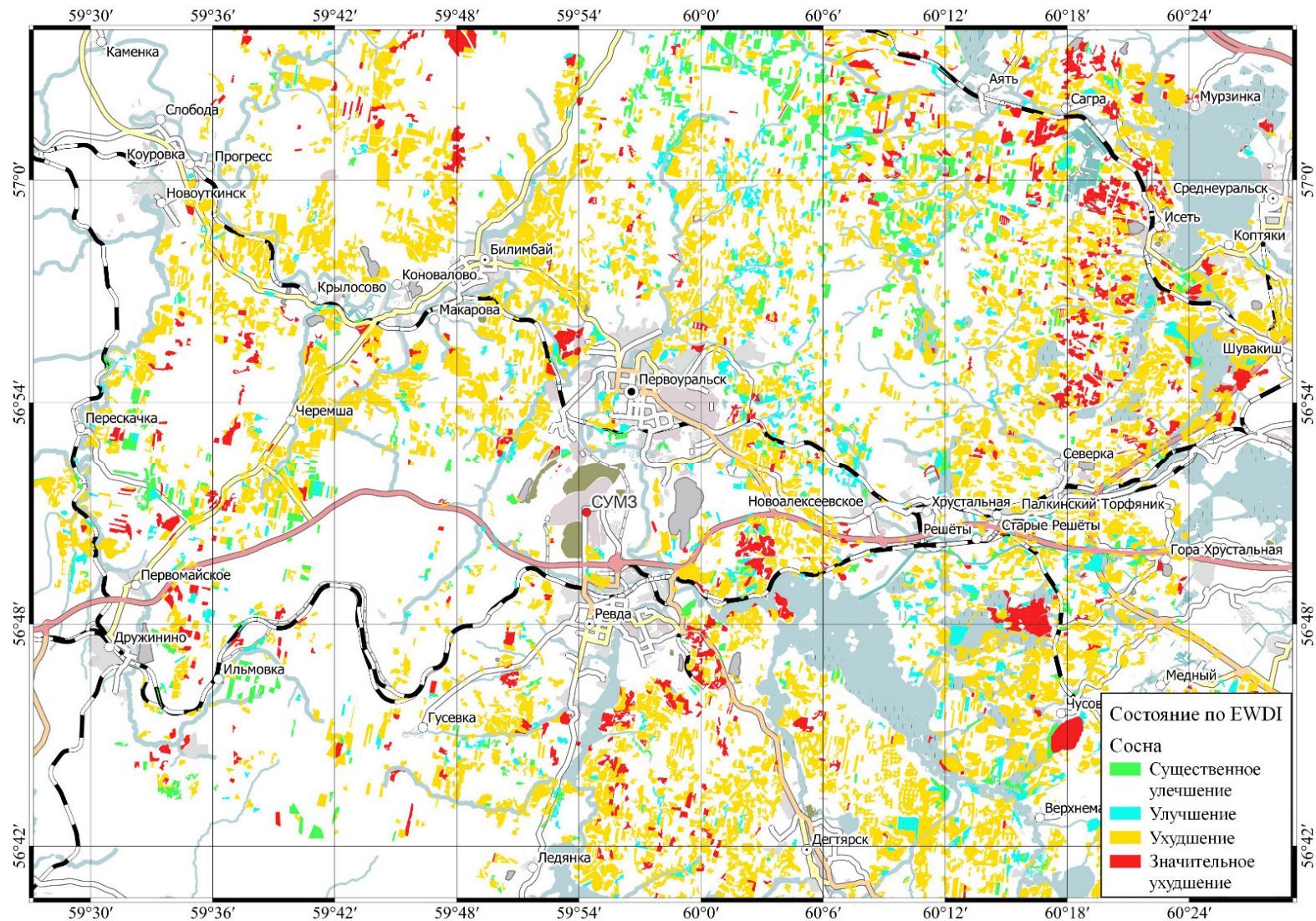


Рисунок 4.9 – Картосхема состояния сосновых насаждений в 1996 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.

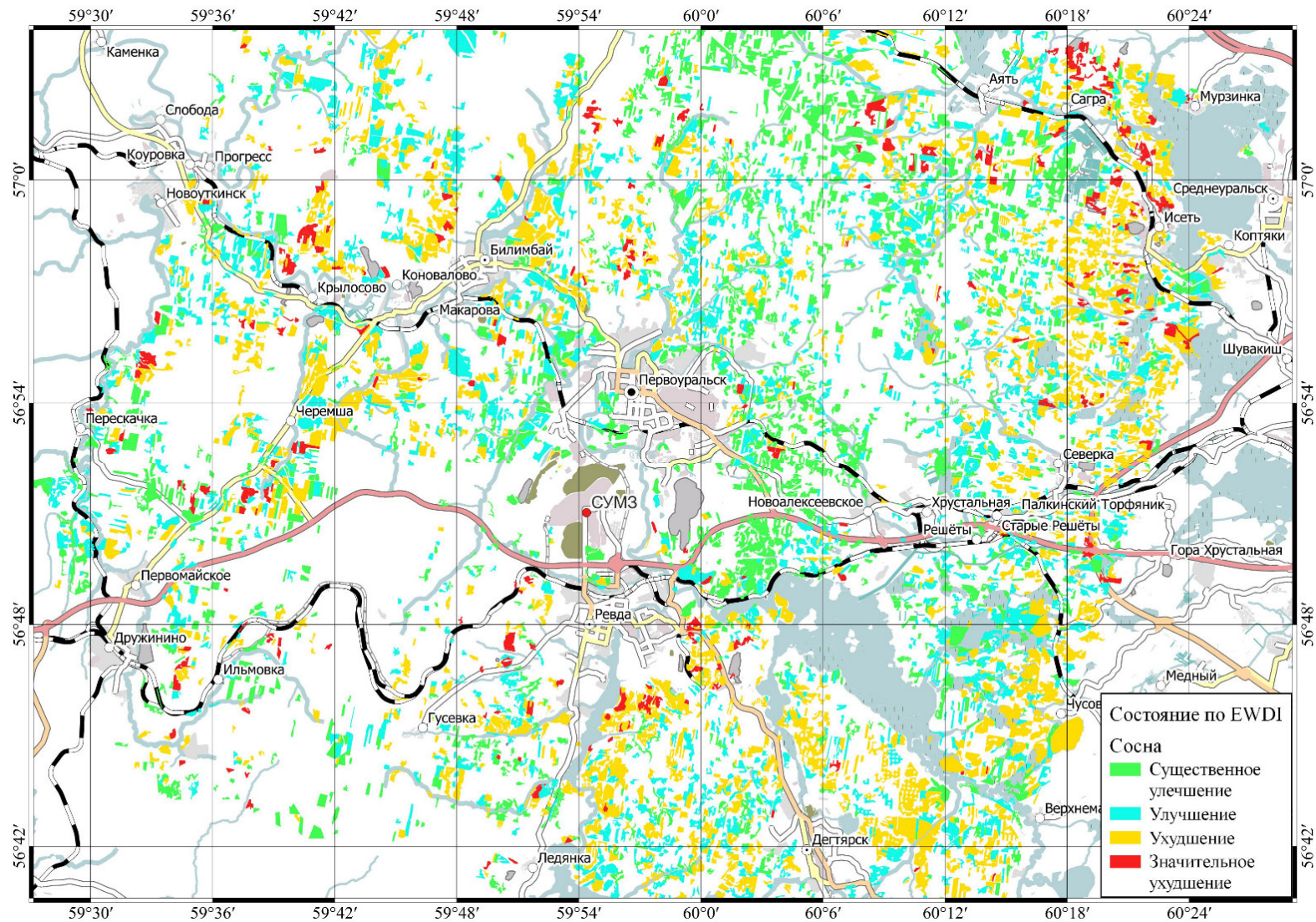


Рисунок 4.10 – Картограмма состояния сосновых насаждений в 2020 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.

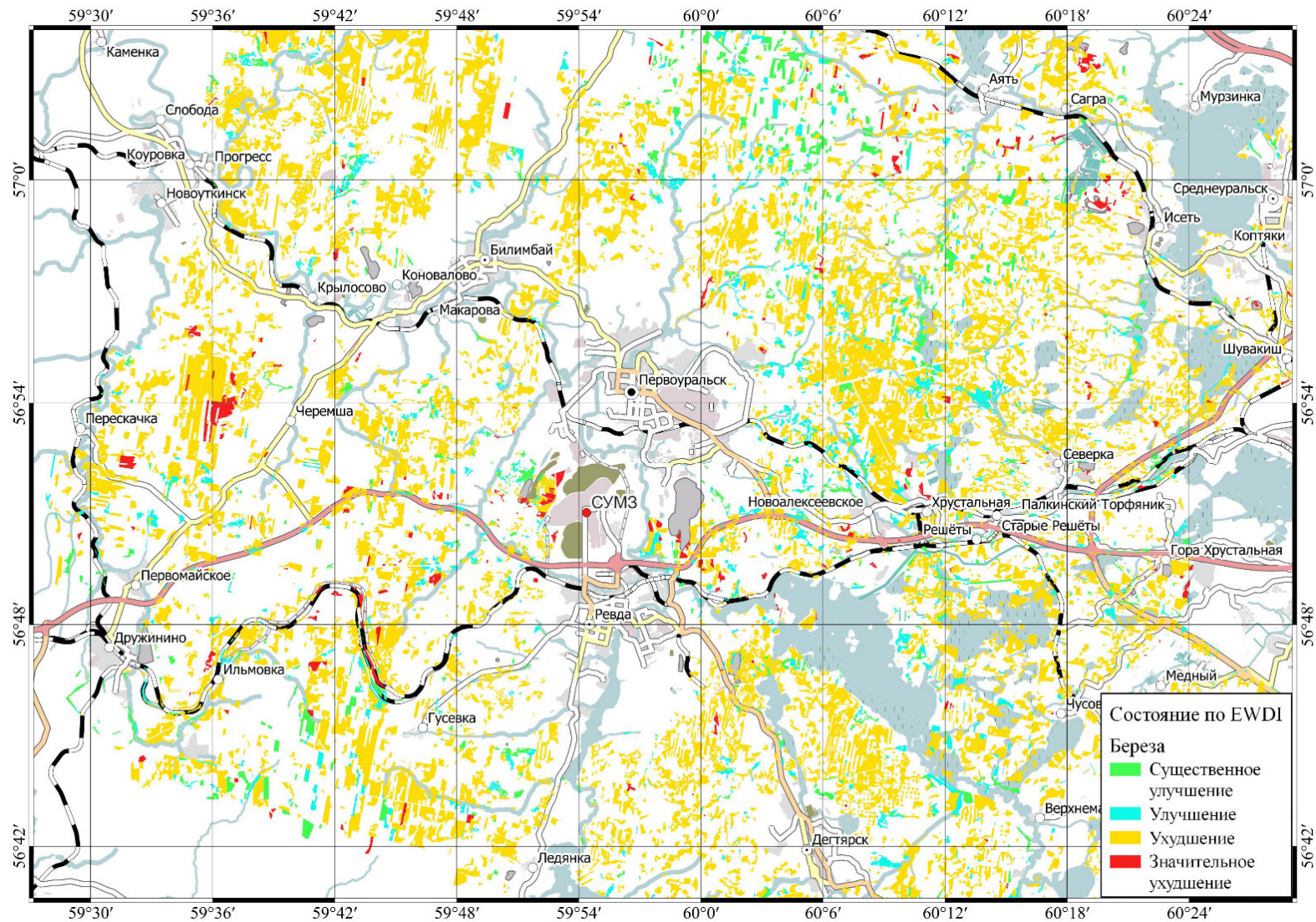


Рисунок 4.11 – Картосхема состояния березовых насаждений в 1996 г., составленная на основе значений улучшенного индекс влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.

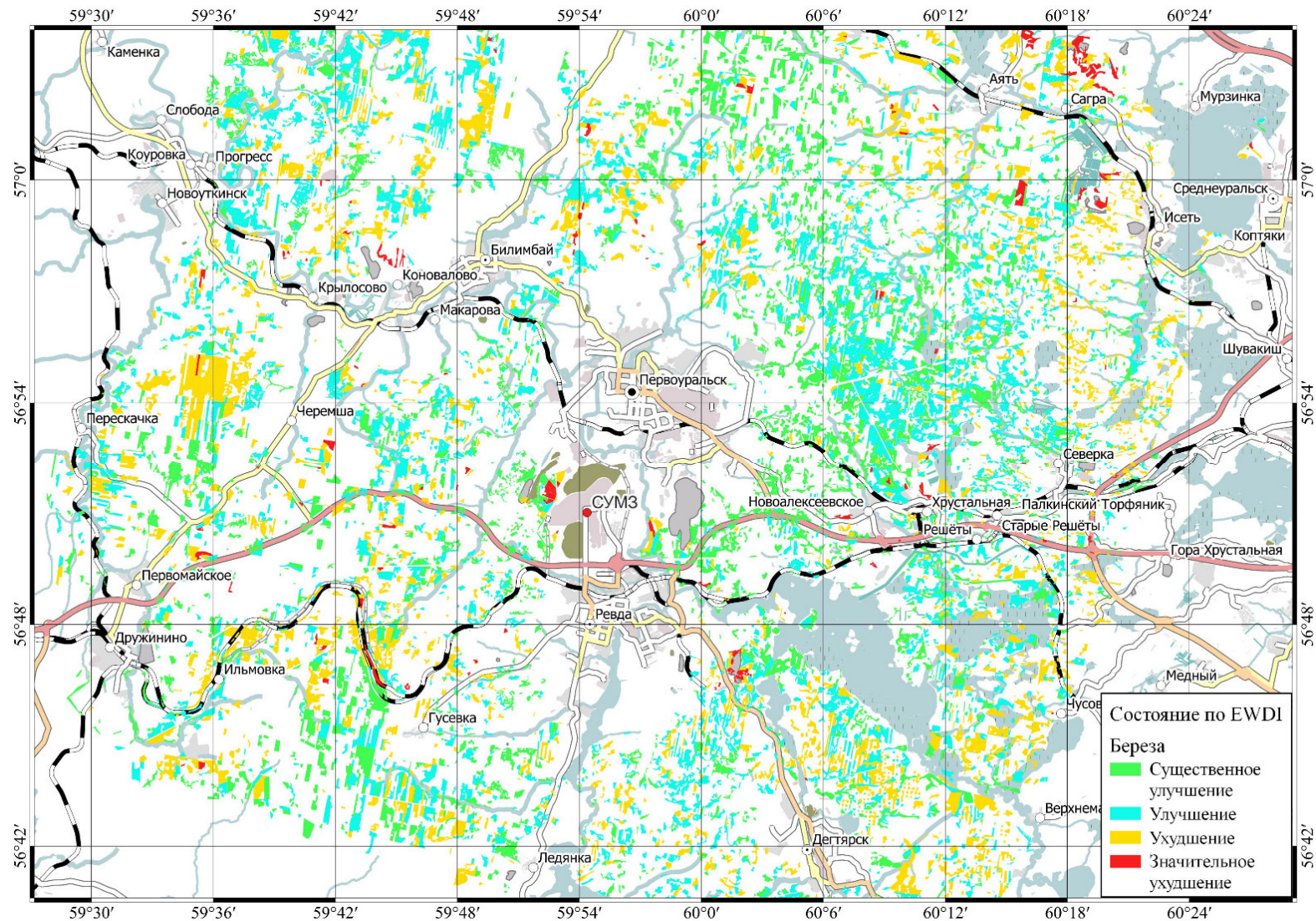


Рисунок 4.12 – Картохема состояния березовых насаждений в 2020 г., составленная на основе значений улучшенного индекс влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.

Пространственное размещение лесных насаждений района исследований и их состояние можно охарактеризовать следующими средневзвешенными таксационными характеристиками древостоев с учетом площадей лесотаксационных выделов.

Сосновые насаждения представлены на общей площади 67790,0 га, средний возраст – 93 года, средняя высота – 21,1 м, средний диаметр – 25,5 см, средний класс бонитета – 2,1, средняя полнота – 0,73, самый распространенный тип леса – 45,3 % сосняк ягодниковый (Сяг), следом идет ельник-сосняк травяной (ЕСтр) – 17,5 %.

Березовые насаждения представлены на общей площади 58281,0 га, средний возраст – 68 лет, средняя высота – 20,5 м, средний диаметр – 19,8 см, средний класс бонитета – 2,3, средняя полнота – 0,76, самый распространённый тип леса – 28,3 % ельник-сосняк травяной (ЕСтр), далее по степени уменьшения – 17,6 % сосняк разнотравный (Сртр), сосняк ягодниковый (Сяг) – 15,2 %.

Еловые насаждения представлены на общей площади 22297,0 га, средний возраст – 84 года, средняя высота – 16,5 м, средний диаметр – 19,1 см, средний класс бонитета – 2,7, средняя полнота – 0,68, преобладает ельник-сосняк травяной (ЕСтр) – 46,3 %, далее ельник разнотравно-зеленомошниковый (Ерзм) – 12,0 %, ельник-сосняк ягодниковый – 5,2 %.

Осиновые насаждения представлены на общей площади 9886,0 га, средний возраст – 52 года, средняя высота – 18,9 м, средний диаметр – 17,6 см, средний класс бонитета – 2,0, средняя полнота – 0,84, преобладает ельник-сосняк травяной (ЕСтр) – 45,9 %, далее ельник-сосняк травяно-липняковый (ЕСтлп) – 11,2 %, сосняк разнотравный (Сртр) – 11,0 %.

Пихтовые насаждения представлены на общей площади 4078,0 га, средний возраст – 88 года, средняя высота – 18,9 м., средний диаметр – 19,66 см, средний класс бонитета – 2,74, средняя полнота – 0,69, преобладает ельник-сосняк травяной (ЕСтр) – 24,4 %, далее ельник разнотравно-зеленомошниковый (Ерзм) – 17,9 %, ельник-сосняк травяно-липняковый (ЕСтлп) – 15,4 %.

Распределение всех лесных насаждений района исследований по типам леса приведено в приложении 34.

В таблицах 4.5 и 4.6 приведены данные динамики площадей для сосновых и березовых насаждений по значениям индекса EWDI по состоянию на 1996 и 2020 г. Для еловых, пихтовых и осиновых аналогичные таблицы приведены в приложении 35.

Таблица 4.5 – 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			

Таблица 4.6 – Динамика изменения площадей березовых 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	4487,0	7,7	19880,0	34,1	+15393,0	+343,1	+26,4
Улучшение	4781,0	8,2	23225,0	39,8	+18444,0	+385,8	+31,6
Ухудшение	47280,0	81,1	14208,0	24,4	-33072,0	-69,9	-56,7
Значительное ухудшение	1733,0	3,0	968,0	1,7	-765,0	-44,1	-1,3
Итого	58281,0	100,0	58281,0	100,0			

Данные таблиц 4.5–4.6 свидетельствуют о значительном улучшении состояния сосновых и березовых 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. Изменение распределения площадей березовых насаждений с улучшением и значительным улучшением состояния в 2020 г. составляет 73,9 % от общей площади березовых насаждений, что обусловлено уменьшением количества и площади участков со значительным ухудшением состояния. Аналогичная динамика площадей установлена для еловых, пихтовых и осиновых (приложение 35).

Одним из недостатков индекса EWDI является его чувствительность к облачности. На картосхемах состояния лесных насаждений 2018 г. (приложение 11, 15, 20, 32) 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.

Также следует обратить внимание на картосхемы 2010 г. На данных картографических материалах можно видеть ухудшение состояния лесных насаждений. Как было написано выше, данный год был аномальным с точки зрения формирования погодных условий.

Установленный 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, лесоустроительных 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). 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 наблюдения 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 лесобразующих 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.

Литература

Аковецкий, В. И. Дешифрирование снимков: учебник для вузов / В. И. Аковецкий. – Москва : Недра, 1983. – 374 с.

Алексеев, А. С. Анализ связей структуры и продуктивности лесов с морфометрическими характеристиками рельефа на примере ландшафтов Ленинградской области / А. С. Алексеев, Д. М. Черниховский // Лесоведение. – 2020. – № 2. – С. 99–114.

Алексеев, А. С. Закономерности пространственного размещения поврежденной растительности при региональном и локальном загрязнении атмосферы (на примере импактной зоны ГМК «Печенганикель») / А. С. Алексеев, Р. Р. Жеребцов // Экология. – 1995. – № 6. – С. 428–435.

Андреева, А. В. Исследование характера изменения оптических характеристик растительности под воздействием тяжелых металлов для разработки метода дистанционной диагностики загрязнения / А. В. Андреева, А. А. Бузников, С. В. Скрыбин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2007. – Т. 2, № 4. – С. 175–182.

Архипова, Н. П. Общая характеристика природы Урала и Свердловской области. Природа Свердловской области / Н. П. Архипова. – Свердловск : Кн. изд-во, 1958. – С. 5–29.

Атлас Свердловской области. – Екатеринбург : Роскартография, 1997. – 48 с.

Барталев, С. А. Новая карта типов земного покрова бореальных экосистем Евразии по данным SPOT 4-VEGETATION / С. А. Барталев, А. С. Белвард, Д. В. Ершов // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве : доклады 3-й Всероссийской конференции, посвященной памяти Г. Г. Самойловича. – Москва, 2002. – С. 30–34.

Барталев, С. А. Разработка методов оценки состояния и динамики лесов на основе данных спутниковых наблюдений : автореферат диссертации на соискание

ученой степени доктора технических наук / С. А. Барталев. – Москва : Институт косм. исслед. РАН, 2007. – 48 с.

Барталев, С. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С. А. Барталев, Ф. В. Стыщенко, В. А. Егоров, Е. А. Лупян // Лесоведение. – 2015. – № 2. – С. 83–94.

Барталев, С. С. Оценка индикаторов состояния лесов Московской области по данным спутниковых наблюдений / С. С. Барталев // Исследовано в России. – 2006. – Т.9 – С. 948–958.

Болсуновский, М. А. Современные подходы к организации оперативного космического мониторинга / М. А. Болсуновский // Геоматика. – 2010. – № 3. – С. 3–18.

Бондур, В. Г. Космический мониторинг импактных районов Арктики / В. Г. Бондур, В. Е. Воробьев // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 4. – С. 4–24.

Борисевич, Д. В. Рельеф и геологическое строение / Д. В. Борисевич // Урал и Приуралье. – Москва : Наука, 1968. – С. 19–81.

Бочко, В. А. Методы обработки и классификации цветных изображений / В. А. Бочко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1992. – № 6. – С. 10–17.

Варламова, Е. В. Исследование вариаций вегетационного индекса NDVI арктической зоны Якутии / Е. В. Варламова, В. С. Соловьев // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2010. – Т. 8, № 7. – С. 226–230.

Владимиров, И. Н. Картографирование восстановительно-возрастной динамики таежных лесов на основе данных, географических знаний и математических моделей / И. Н. Владимиров // ИнтерКарто/ИнтерГИС16. Устойчивое развитие территорий : Теория ГИС и практический опыт : материалы Международной научной конференции. – Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2010. – С. 242-248.

Владимиров, И. Н. Моделирование пространственно-временной динамики лесных ресурсов с использованием интеллектуальной ГИС / И. Н. Владимиров, А. К. Попова // География и природные ресурсы. – 2009. – № 1. – С. 26-31.

Владимирова, Н. А. Возможности применения космических снимков для государственной инвентаризации лесов / Н. А. Владимирова // Геопрофи. – 2010. – № 2. – С. 45–49.

Водорегулирующая роль таежных лесов. – Москва : 1990. – 223 с.

Воробейчик, Е. Л. Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объемов его выбросов / Е. Л. Воробейчик, С. Ю. Кайгородова // Почвоведение. – 2017. – № 8. – С. 1009-1024.

Воробейчик, Е. Л. Реакция лесной подстилки и ее связь с почвенной биотой при токсическом загрязнении / Е. Л. Воробейчик // Лесоведение. – 2003. – № 2. – С. 32–42.

Воробейчик, Е. Л. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень) / Е. Л. Воробейчик, О. Ф. Садыков, М. Г. Фарафонов. – Екатеринбург : УИФ Наука, 1994. – 280 с.

Воробьев, О. Н. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, Ю. А. Полевщикова, С. А. Лежнин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 124–134.

Гаврилова, И. В. Динамика роста и оценка состояния культур сосны обыкновенной на вейниково-луговиковых вырубках методами дистанционного зондирования / О. И. Гаврилова, И. В. Морозова, Ю. В. Ольхин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 1(373). – С. 63-74

Генин, В. И. Описание Уральских и Сибирских заводов в 1735 г. / В. И. Генин. – Москва : Изд-во АН СССР, 1937. – С. 47–53.

Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2006. – 1072 с.

Григорьев, Ю. С. Методика определения токсичности проб поверхностных пресных, грунтовых, питьевых, сточных вод и отходов по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) (ПНД ФТ 14.1:2:3:4.10-04, 16.1:2:3:3.7-04). – Москва : МПР России, 2004. – 25 с.

Данюлис, Е. П. Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве / Е. П. Данюлис, В. М. Жиринов, В. И. Сухих, Р. И. Эльман. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 223 с.

Дюкарев, А. Г. Мониторинг лесных земель для оценки лесовосстановления на территориях с гидроморфным трендом / А. Г. Дюкарев, Н. Н. Пологова, И. А. Бех // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 3, № 1. – С. 150–154.

Евдокимов, В. П. Алгоритмы геодезической привязки кадров фотоархива от спутников «Океан-О» и «Ресурс-О1» / В. П. Евдокимов, А. М. Кочергин, В. И. Нефедов // Радиоэлектроника. Геоинформатика : тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Космонавтика. – Рязань, 2007. – С. 219–220.

Егоров, А. П. Способы модернизации базовых классификаций антропогенных ландшафтов / А. П. Егоров, В. В. Козин // Вестник ВГУ, Серия : География. Геоэкология. – 2006. – №2. – С. 25–30.

Егошкин, Н. А. Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по диску Земли / Н. А. Егошкин, А. М. Кочергин // Современные проблемы ДЗЗ : тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Москва, 2005. – С. 132.

Жиринов, В. М. Анализ значений вегетационного индекса и данных инвентаризации лесов северной Якутии / В. М. Жиринов // Лесоведение. – 1997. – № 1. – С. 35–44.

Жиринов, В. М. Развитие системы инвентаризации лесов в России / В. М. Жиринов, Н. В. Лукина // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2017. – Т. 21, № 2. – С. 4–14.

Злобин, В. К. Обработка аэрокосмических изображений / В. К. Злобин, В. В. Еремеев. – Москва : Физматлит, 2006. – 288 с.

Зубарева, Р. С. Пространственная дифференциация и классификация типов леса Билимбаевского массива / Р. С. Зубарева // Научные основы использования и воспроизводства таежных лесов Среднего Урала. – 1986. – № 2. – С. 30–31.

Изображения Земли из космоса, примеры применения : научно-популярное издание – Москва : ООО Инженерно-технологический центр «Сканекс», 2005. – 100 с.

Ильючик, М. А. Аэрокосмические технологии и средства учета текущих изменений в лесном фонде Беларуси / М. А. Ильючик // Леса Евразии в XXI веке : Восток-Запад : материалы 2 Международной конференции молодых ученых. – Москва, 2002. – С. 39–41.

Исаев, А. С. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов / А. С. Исаев, С. В. Князева, М. Ю. Пузаченко, Т. В. Черненко // Исследование земли из космоса. – 2009. – № 2. – С. 1–12.

Каминский, А. А. Климатический очерк Уральской области / А. А. Каминский, Е. С. Рубинштейн // Уральский статистический ежегодник. – 1925. – Серия 1, Т. 2. – С. 591–611.

Капустин, В. Г. География Свердловской области / В. Г. Капустин, И. Н. Корнеев. – Екатеринбург : Средне-Уральское книжное издательство, 1996. – 281 с.

Катаманов, С. Н. Автоматический метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/VISSR изображений с пиксельной точностью / С. Н. Катаманов // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 3. – С. 55–66.

Киселев, В. Н. Лихеноиндикация загрязнения воздушной зеленых зон промышленных центров Белоруссии / В. Н. Киселев, К. Д. Чубанов, А. В. Бойко, В. А. Лукашев [и др.] // Экология. – 1986. – №2. – С. 30–35.

Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного

зондирования Земли // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. – 2009. – № 2. – С. 40–45.

Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учебник / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – Москва : Академия, 2011. – 416 с.

Колесников, Б. П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области : практическое руководство / Б. П. Колесников, Р. С. Зубарева, Е. П. Смолоногов. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1974. – 178 с.

Комаров, А. В. Информативность спектральных и морфометрических признаков оконной структуры полога древостоя на основе спутниковых данных / А. В. Комаров, Д. В. Ершов, Е. В. Тихонова // Лесоведение. – 2021. – № 3. – С. 227–239.

Кондратьев, К. Я. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности / К. Я. Кондратьев, П. П. Федченко. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. – 216 с.

Копанев, И. Д. Методы изучения снежного покрова / И. Д. Копанев. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1971. – 226 с.

Космическая система «Метеор-ЗМ» № 1. Дистанционное зондирование Земли : Справочные материалы. – Санкт Петербург : Гидрометеиздат, 2001. вып. 1. – 99 с.

Кочергин, А. М. Технологии географической привязки кадров спутникового фотоархива при их каталогизации / А. М. Кочергин // «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» : тезисы доклада Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань, 2007. – С. 321–322.

Кравцова, В. И. Динамика лесного покрова Московского региона по картографическим материалам и космическим снимкам / В. И. Кравцова, И. К. Лурье, А. В. Жуков // Лесоведение. – 2002. – № 5. – С. 67–75.

Кринов, Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований / Е. Л. Кринов. – Москва : Изд-то АН СССР, 1947. – 273 с.

Кронберг, П. Дистанционное изучение Земли / П. Кронберг. – Москва : Мир, 1988. – 350 с.

Крючков, В. В. Лишайники как биоиндикаторы качества окружающей среды в северной тайге / В. В. Крючков, Н. А. Сыроид // Экология. – 1990. – № 6. – С. 63–66.

Крючков, В. В. Предельные антропогенные нагрузки и состояние экосистем Севера / В. В. Крючков // Экология. – 1991. – № 3. – С. 28–40.

Кучко, А. С. Аэрофотография и специальные фотографические исследования / А. С. Кучко. – Москва : Недра, 1988. – 236 с.

Лабутина, И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков : учебное пособие для студентов вузов / И. А. Лабутина. – Москва : Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. – Свердловск, 1973. – С. 12–15.

Луганский, Н. А. Лесоведение / Н. А. Луганский, С. В. Залесов, В. А. Щавровский. – Екатеринбург, 1996. – 372 с.

Марущак, И. О. Материалы спутникового мониторинга в анализе сомкнутости лесных фитоценозов приполярного Урала / И. О. Марущак, В. В. Елсаков // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2010. – Т.7, № 1. – С. 310–318.

Медведева, М. А. О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным / М. А. Медведева, В. В. Елсаков, И. Ю. Савин, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2010. – Т.7, – № 1. – С. 319–329.

Методические подходы к оценке характеристик лесов по данным спутниковой съемки сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом

диапазоне / С. В. Князева, А. Д. Никитина, Е. И. Белова [и др.] // Лесоведение. – 2021. – № 6. – С. 645-672.

Милюков, Ф. Н. Человек и ландшафты: очерки антропогенного ландшафтоведения. – Москва : Мысль, 1973. – 224 с.

Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы под ред. А. С. Исаева. – Москва : Наука, 2008. – 453 с.

Мультифункциональность и биоразнообразие лесных экосистем / Д. Н. Тебенькова, Н. В. Лукина, С. И. Чумаченко [и др.] // Лесоведение. – 2019. – № 5. – С. 341-356.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. – Ленинград : Гидрометиздат, 1985. – Ч. 1, Вып. 3. – 300 с.

Национальный доклад Российской Федерации по критериям и индикаторам сохранения и устойчивого управления умеренными и бореальными лесами (Монреальский процесс). – Москва : ВНИИЛМ, 2003. – 84 с.

Низаметдинов, Н. Ф. Оценка состояния сосновых древостоев в условиях аэропромышленного загрязнения атмосферы по цифровым фотографиям крон деревьев и спутниковым фотоснимкам : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. – Екатеринбург, 2009. – 19 с.

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.

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://research-journal.org/archive/9-123-2022-september/10.23670/IRJ.2022.123.77

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.

Папулов, Е. С. Устойчивость сосновых древостоев к действию техногенных загрязнений в районе Первоуральско-Ревдинского промышленного узла : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. – Екатеринбург, 2003. – 170 с.

Патент № 2069851 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/64, G01N 33/00. Способ определения содержания фитотоксических веществ : № 5054869/25 : заявл. 15.07.1992 : опубл. 27.11.1996 / Ю. С. Григорьев, Е. А. Фуряев, А. А. Андреев.

Патент № 2375714 С2 Российская Федерация, МПК G01N 33/24. Способ определения токсичности почв : № 2007145024/12 : заявл. 03.12.2007 : опубл. 10.12.2009 / С. А. Шавнин, И. А. Юсупов, Н. В. Марина, Г. Н. Новоселова.

Плотникова, А. С. Пространственная оценка современных пожарных режимов лесных экосистем России / А. С. Плотникова, Д. В. Ершов, А. О. Харитонов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, №5. – С. 228–240.

Попов А. С. Влияние мезоклимата и атмосферных промышленных загрязнений на радиальный прирост сосны обыкновенной / А. С. Попов, В. В. Фомин, Ю. В. Шалаумова // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 4 (83). – С. 15–18.

Прокаев В. И. Физико-географическое районирование Свердловской области. – Свердловск, 1976. – 137 с.

Прэтт У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт ; пер. с англ. – Москва: Мир, 1982. – Кн. 1. – 312 с.

Рачкулик, В. И. Отражательные свойства и состояние растительного покрова / В. И. Рачкулик, М. В. Ситникова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. – 220 с.

Селиванов, А. С. Оперативная система наблюдения Земли «Ресурс-01» / А. С. Селиванов, Ю. М. Тучин, А. С. Селиванов // Исследование Земли из космоса. – 1988. – № 3. – С. 101–106.

Сороковой, А. А. Геоинформационный анализ и моделирование современного состояния растительности (на примере юго-восточного макросклона Байкальского хребта) / А. А. Сороковой, И. Н. Владимиров // ИнтерКарто / ИнтерГИС-16. Устойчивое развитие территорий: Теория ГИС и практический опыт : материалы Международной научной конференции. – Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2010. – С. 277–280.

Справочник потребителя спутниковой информации. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2005. – 112 с.

Стыценко, Ф. В. Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозеленых лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / Ф. В. Стыценко, С. А. Барталев, А. В. Букась [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. № 5. – С. 217–227.

СУМЗ: История // СУМЗ: [сайт] – URL: <https://www.sumz.umn.ru/ru/about/history/> (дата обращения: 30.05.2023).

СУМЗ: Общая информация о снижении воздействия на окружающую среду // [сайт] – URL: <https://www.sumz.umn.ru/ru/activity/ecology/obshchaya-informatsiya-o-snizhenii-vozdeystviya-na-okruzhayushchuyu-sredu/> (дата обращения: 30.05.2023).

Сухих, В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве : учебник для вузов / В. И. Сухих // Йошкар-Ола : МарГТУ, 2005. – 382 с.

Сухих, В. И. Об информативности материалов космических съемок, получаемых с современных гражданских космических аппаратов / В. И. Сухих, В. М. Жирин // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве : доклады III Всероссийской конференции. – Москва : ЦЭПЛ РАН, 2002. – С. 207–213.

Сухих, В. И. Применение сканерных космических снимков при инвентаризации резервных лесов / В. И. Сухих, В. М. Жирин // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии : материалы Всероссийского совещания. – Красноярск : Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2005. – С. 92–96.

Сухих, В. И. Функциональная структура космического сегмента мониторинга лесов России / В. И. Сухих // Исследования Земли из космоса. – 2001. – № 3. – С. 61–76.

Фирсова, В. П. Почвенный покров Билимбаевского лесхоза / В. П. Фирсова, Т. С. Павлова, В. С. Дедков, Е. В. Прокопевич // Научные основы использования и воспроизводства таежных лесов Среднего Урала. – Свердловск, 1986. – С. 45–87.

Фирсова, В. П. Серые лесные почвы Предуралья и их рациональное использование / В. П. Фирсова, Т. С. Павлова, И. А. Ужегова, В. С. Дедков. – Свердловск, 1982. – С. 3–44.

Фомин, В. В. Влияние горного рельефа местности и аэропромышленных загрязнений на биометрические характеристики сосновых древостоев / В. В. Фомин, С. А. Шавнин // Экология. – 2002. – № 3. – С. 170–174.

Фомин, В. В. Географо-генетический подход к оценке и прогнозированию лесных ресурсов с использованием ГИС-технологий / В. В. Фомин, С. В. Залесов // Аграрный вестник Урала. – 2013. – № 12(118). – С. 18–24.

Фомин, В. В. Климатогенная и антропогенная динамика древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания (на примере Урала) : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Фомин Валерий Владимирович. – Екатеринбург, 2011. – 310 с.

Фомин, В. В. Климатогенная и антропогенная пространственно-временная динамика древесной растительности во второй половине XX века / В. В. Фомин. – Екатеринбург : ИЭРиЖ УрО РАН, 2009. – 150 с.

Фомин, В. В. Морфологическая оценка состояния сосновых молодняков в зоне действия атмосферных загрязнений Первоуральско-Ревдинского

промышленного узла : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. – Екатеринбург, 1998. – 149 с.

Фомин, В. В. Неспецифическая реакция фотосинтетического аппарата хвои сосны на действие аэропромышленных загрязнений и затенения / В. В. Фомин, С. А. Шавнин, Н. В. Марина, Г. Н. Новоселова // Физиология растений. – 2001. – Т. 48, № 5. – С. 760–765.

Фомин, В. В. Разработка и использование количественных методов и моделей для оценки климатогенной и антропогенной динамики древесной растительности в экстремальных условиях ее произрастания / В. В. Фомин. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2008. – 197 с.

Фомин, В. В. Экологическая оценка территории в зоне действия медеплавильного производства / В. В. Фомин, А. А. Николаев // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 4 (83). – С. 18–20.

Фомин, В. В. Экологический фотомониторинг естественных и антропогенных ландшафтов / В. В. Фомин, А. П. Михайлович // Аграрный вестник Урала. – 2013. – № 11(117). – С. 16–21.

Фомин, В. В. Экологическое зонирование состояния лесов в зонах действия атмосферных промышленных загрязнений / В. В. Фомин, С. А. Шавнин // Экология. – 2001. – № 2. – С. 103–107.

Фомин, В. В. Экологическое картирование территории в условиях антропогенных воздействий разной природы и силы / В. В. Фомин // Аграрный вестник Урала. – 2012. – № 12(104). – С. 7–8.

Фраленко, В. П. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли / В. П. Фраленко // Программные системы: теория и приложения. – 2014. – Т. 5, № 4(22). – С. 19–39.

Харин, Н. Г. Применение снимков NOAA/AVHRR для изучения фенологии лесов России / Н. Г. Харин, Р. Татеиши // Лесоведение. – 2003. – № 2. – С. 10–17.

Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – Москва : Техносфера, 2008. – 312 с.

Черенькова, Т. В. Динамика лесов Подмосковья по материалам космической съемки / Т. В. Черенькова, Д. Н. Козлов // Земля из космоса. Наиболее эффективные решения. – 2009. – № 1. – С. 22–27.

Черепанов, А. С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А. С. Черепанов, Е. Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – №3. – С. 28–32.

Черенькова, Т. В. Оценка биоразнообразия лесов в зоне влияния горно-металлургического комбината «Североникель» / Т. В. Черенькова, Е. В. Басова, Ю. Н. Бочкарев [и др.] // Лесоведение. – 2009. – № 6. – С. 32–45.

Черниковский, Д. М. Оценка взаимосвязей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов / Д. М. Черниковский // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – № 216. – С. 69–90.

Шарый, П. А. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна / П. А. Шарый, Л. С. Шарая, Л. В. Сидякина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 154–163.

Шейдеггер, К. Лихеноиндикация и морфофизиологическая оценка состояния древостоев в экологическом мониторинге лесов в загрязненных районах Среднего Урала / К. Шейдеггер, К. Штейнмайер, Д. Пезотта [и др.] // Леса Урала и хозяйство в них. – 1998. – Вып. 20. – С. 393–405.

Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модель и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – Москва : Техносфера, 2010. – 560 с.

Assal, T. J. Monitoring long-term riparian vegetation trends to inform local habitat management in a mountainous environment / T. J. Assal, V. A. Steen, T. Caltrider // Ecological indicators. – 2021. – Vol. 127, № 107807.

Avery, T. E. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. 5th ed / T. E. Avery, G. L. Berlin. – N.Y. : MacMillan Publ. Co., 1992. – 250 p.

Batistella, M. Mapping and monitoring land degradation risks in the Western Brazilian Amazon using multitemporal LANDSAT TM/ETM+ images / M. Batistella, D. Lu, E. Moran // *Land degradation and development*. – 2007. – Vol. 18. – P. 41–54.

BEAR: Indicators for monitoring and evaluation of forest biodiversity in Europe. Technical report 7. 2001. – 250 p.

Berberoglu, S. Modeling Forest Productivity Using Envisat MERIS Data / S. Berberoglu, F. Evrendilek, C. Ozkan, C. Donmez // *Sensors*. – 2007. – № 89. – P. 2115–2127.

Bolyn, C. Mapping tree species proportions from satellite imagery using spectral-spatial deep learning / C. Bolyn, P. Lejeune, A. Michez, N. Latte // *Remote sensing of environment*. – 2022. – Vol. 280, № 113205.

Boyd, D. S. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development / D. S. Boyd, F. M. Danson // *Progress in Physical Geography*. – 2005. – Vol. 29, № 1. – P. 1–26.

Breidenbach, J. National mapping and estimation of forest area by dominant treespecies using Sentinel-2 data / J. Breidenbach, L. T. Waser, M. Debella-Gilo [et al.] // *Canadian journal of forest research*. – 2021. – Vol. 51, № 3. – P. 365–379.

Calches, C. Exploitation of the SPOT system / C. Calches, Y. Trempât // *Geocarto International*. – 1986. – № 3. – P. 15–23.

Chander, G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM; ETM+, and EO-1 ALE sensors / G. Chander, B. Markham, D. L. Helder // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Vol. 113, № 5. – P. 893–903.

Chandra, A. M. Remote sensing and geographical information system / A. M. Chandra, S. K. Ghosh. – Norsa Publishing House, 2006. – 312 p.

Chen, W. Estimation of forest parameters based on TM imagery and statistical analysis / Wen-bo Chen, Xiao-fan Zhao // *Journal of Forestry Research*. – 2007. – Vol. 18, № 3. – P. 241–244.

Crist, E. P. A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data The TM Tasseled Cap / E. P. Grist, R. C. Cicone // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. – 1984. – Vol. 22, № 3. – P. 256–263.

Eklundh, L. Investigating relationships between Landsat-ETM+ sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest / L. Eklundh, L. Нагие; A. Kuusk // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 78, № 3. – P. 239–251.

Feng, L. Attempts to improve goes image navigation / L. Feng, W. P. Menzel, C. S. Velden [et al.] // *Proc. of 8th International Winds Workshop*. – 2006. – P. 47.

Fomin V. Russian Approaches to the Forest Type Classification / V. Fomin, A. Mikhailovich // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 906. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/906/1/012023>

Fomin, V. Development of ideas within the framework of the genetic approach to the classification of forest types / V. Fomin, A. Mikhailovich, S. Zalesov [et al.] // *Baltic Forestry*. – 2021. – Vol. 27(1). – P. 1 – 14.

Fomin, V. Reconstruction of the Expansion of Siberian Larch into the Mountain Tundra in the Polar Urals in the 20th–Early 21st Centuries / V. Fomin, A. Mikhailovich, D. Golikov, E. Agapitov // *Forests*. – 2022. – № 13(3). – P. 419.

Fomin, V. V. Historical avenues of research in Russian forest typology: ecological, phytocoenotic, genetic, and dynamic classifications / V. V. Fomin, S. V. Zalesov, A. S. Popov, A. P. Mikhailovich // *Canadian Journal of Forest Research*. 2017. – Vol. 47, №. 7. – P. 849–860.

Forest Monitoring and Remote Sensing, A Survey of Accomplishments and Opportunities for the Future / DJ Peterson, Susan Resetar, Jennifer Brower, Ronald Diver. – 1999. – 90 p.

Franco-Lopez, H. Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method / H. Franco-Lopez, A. R. Ek, M. E. Baue // *Remote Sensing of Environment*. – 2001. – Vol. 77. – P. 251–274.

Garioud, A. Recurrent-based regression of Sentinel time series for continuous vegetation monitoring / A. Garioud, S. Valero, S. Giordano, C. Mallet // *Remote sensing of environment*. – 2021. – Vol. 263, №. 112419.

Hall, R. J. Relating aspen defoliation to changes in leaf area derived from field and satellite Remote sensing data / R. J. Hall, R. A. Fernandes, E. H. Hogg [et al.] // *Canadian Journal Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 29, № 3. – P. 229–313.

Hansen, M. Classification trees an alternative to traditional land cover classifiers / M. Hansen, R. Dubayah, R. DeFries // International Journal of Remote Sensing. – 1996. – 17(5). – P. 1075–1081.

Hermosilla, T. Mass data processing of time series Landsat imagery: pixels to data products for forest monitoring / T. Hermosilla, M. A. Wulder, J. C. White [et al.] // International J. Digital Earth. – 2016. – Vol. 9. – P. 1035–1054.

Ivanova, N. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics / N. Ivanova, V. Fomin, A. Kusbach // Sustainability. – 2022. 14(6): 3384. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/6/3384>

Jha, C. S. Forest fragmentation and its impact on species diversity: an analysis using remote sensing and GIS / C. S. Jha, L. Goparaju, A. Tripathi [et al.] // Biodiversity and Conservation. – 2005. – Vol. 14. № 7. – P. 1681–1698.

Ji, M. Effectiveness of Subpixel Analysis in Detecting and Quantifying Urban Imperviousness from Landsat Thematic Mapper Imagery / M. Ji, J. R. Jensen // Geocarto International. – 1999. – 14(4). – P. 33–41.

Jing, X. Study on forest vegetation classification based on multi-temporal remote sensing images / X. Jing, J. Wang, W. Huang [et al.] // Computer and Computing Technologies in Agriculture. – 2009. – Vol. 1. – P. 115–123.

Jupiter, S. D. Changes in Forest Area Along Stream Networks In an Agricultural Catchment of the Great Barrier Reef Lagoon / S. D. Jupiter, G. S. Marion // Environmental Management. – 2008. – Vol. 42, № 1. – P. 66–79.

Kajisa, T. Object-based forest biomass estimation using Landsat ETM+ in Kampong Thorn Province, Cambodia / T. Kajisa, T. Murakami, N. Mizoue [et al.] // Journal of Forest Research. – 2009. – Vol. 14, № 4. – P. 203–211.

Kauth, R. J. The Tasseled Cap – a graphical description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat / R. J. Kauth, G. S. Thomas // Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1976. – P. 4B41–4B51.

Kim, J. W. Correlation Analysis Between Forest Volume, ETM+ Bands, and Height Estimated from C-Band SRTM Product / J. W. Kim, J. B. Lee, J. Heo // *Korean Journal of Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 22, № 5. – P. 427–431.

King, D. J. Floodplain forest structure and the recent decline of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch (northern pecan) at its northern latitudinal range margin, Upper Mississippi River System, USA / D. J. King, G. L. Harley, J. T. Maxwell [et al.] // *Forest ecology and management*. – 2021. – Vol. 496, №. 119454.

King, D. J. Modelling and Mapping Damage to Forests from an Ice Storm Using Remote Sensing and Environmental Data / D. J. King, I. Olthof, K. E. Pellikka [et al.] // *Natural Hazards*. – 2005. – Vol. 35, № 3. – P. 321–342.

Lambin, E. F. Monitoring forest degradation in tropical regions by remote sensing: some methodological issues / E. F. Lambin // *Global Ecology and Biogeography*. – 1999. – Vol. 8, № 3–4. – P. 191–198.

Landerburger, L. Mapping Regional Distribution of a Single Tree Species: Whitebark Pine in the Greater Yellowstone Ecosystem / L. Landenburger, R. L. Lawrence, S. Podruzny, C. C. Schwartz // *Sensors*. – 2008. - № 8. – P. 4983–4994.

Lu, D. Comparison of Land-Cover Classification Methods in the Brazilian Amazon Basin / D. Lu, P. Mausel, M. Batistella, E. Moran // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 70, № 6. – P. 723–731.

Lüderitz, V. The effect pH on copper toxicity to blue-green alga / V. Lüderitz, A. Nicklisch // *Int. Revue der Hydrobiol.* – 1989. – 74, № 3. – P. 283–291.

Lutz, D. Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review / D. A. Lutz, R. A. Washington-Allen, H. H. Shugart // *Canadian Journal Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 34, № 2. – P. 286–313.

Makela, H. Estimation of timber volume at the sample plot level by means of image segmentation and Landsat TM imagery / H. Makela, A. Pekkarinen // *Remote Sensing of Environment*. – 2001. – Vol. 77, № 1. – P. 66–75.

Matsushita, B. Detecting forest degradations in Kochi, Japan: ground-based, measurements versus satellite (Terra/ASTER) remote sensing / B. Matsushita, Mi Xu, Y. Onda [et al.] // Hydrological processes. – 2010. – Vol. 24. № 5. – P. 588–595.

Ministerial conference on the protection of forests in Europe (MCPFE). Sound forestry - sustainable development. – Helsinki: Ministry of Agr. and Forest, 1993. – 161 p.

Mostafavi, H. Image correlation with geometric distortion / H. Mostafavi, F. W. Smith // IEEE Trans. – 1978. – Vol. AES-14. – P. 122–135.

Mouchet, M. Bundles of ecosystem (dis) services and multifunctionality across European landscapes / M. Mouchet, M.L. Paracchini C.J.E. Schulp [et al.] // Ecological Indicators. – 2017. – Vol. 73. – P. 23–28.

Murakami, T. Seasonal variation in classification accuracy of forest-cover types examined by a single band or band combinations / T. Murakami / Journal Forest Research. – 2004. – Vol. 9, № 3. – P. 211–215.

Nordberg, M. L. Vegetation index differencing and linear regression for change detection in Swedish mountain range using LANDSAT TM and ETM+ image / M. L. Nordberg, J. Evertson // Land degradation and development. – 2005. – Vol. 16, № 2. – P. 139–149.

Ottosen, T. B. Tree cover mapping based on Sentinel-2 images demonstrate high thematic accuracy in Europe / T. B. Ottosen, G. Petch, M. Hanson, C. A. Skjøth // International journal of applied Earth observation and geoinformation. – 2020. – Vol. 84. – P. 1–12.

Peterson, D. Forest Monitoring and Remote Sensing A Survey of Accomplishments and Opportunities for the Future / D. J. Peterson, S. Resetar, J. Brower, R. Diver // Science and Technology Policy Institute. – 1999. – 90 p.

Pu, R. Oakwood crown closure estimation by unmixing Landsat TM data / R. Pu, B. Xu, P. Gong // Int. J. Remote Sensing. – 2003. – Vol. 24, № 22. – P. 4433–4445.

Rees, W.G. Physical principles of remote sensing: second edition. – Cambridge University Press, 2001. – 340 p.

Salajanu, D. The significance of spatial resolution - identifying forest cover from satellite data / D. Salajanu, C. E. Olson // *Journal of Forestry*. – 2001. – Vol. 99, № 6. – P. 32–38.

Schowengerdt, R. A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* / R.A. Schowengerdt. – Amsterdam, 2007. – 515 p.

Shavnin, S. A. Application of the Generalized State Index Determination to Ecological Monitoring of Forests in Polluted Areas / S. A. Shavnin, V. V. Fomin, N. V. Marina // *Measurement and Modeling in Environmental Pollution*. – Southampton, UK and Boston, USA: Computational Mechanics Publications, 1997. – P. 399–407.

Soliveres, S. Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality / S. Soliveres, F. Van Der Plas, P. Manning [et al.] // *Nature*. – 2016. – Vol. 536, № 7617. – P. 456–459.

Song, C. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data. When and How to Correct Atmospheric Effects? / C. Song, C. E. Woodcock, K. C Seto [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. - 2007. - V. 75, № 2. - P. 23-79.

The Montreal process. Criteria and indicators for the conservation and sustainable management of temperate and boreal forests. – Hull. (Quebec): Canadian Forest Service, 1995. – 120 p.

Tsutsumi, M. Estimating the spatial distribution of available biomass in grazing forests with a satellite image: A preliminary study / M. Tsutsumi, K. Kawamura, M. Sugiyama [et al.] // *Japanese Society of Grassland Science*. – 2005. – Vol. 51, № 2. – P. 107–111.

Van der Plas F. Continental mapping of forest ecosystem functions reveals a high but unrealised potential for forest multifunctionality / F. Van der Plas, S. Ratcliffe, P. Ruiz-Benito // *Ecology Letters*. – 2018. – Vol. 21, № 1. – P. 31–42.

Virk, R. Comparison of Techniques for Forest Change Mapping Using Landsat Data in Karnataka, India / R. Virk, D. King // *Geocarto International*. – 2006. – Vol. 21, № 4. – P. 49–57.

Wulder, M. A. Evaluation of Landsat-7 SLC-off image products for forest change detection / M. A. Wulder, S. M. Ortlepp, J. C White, S. Maxwell // Canadian Journal Remote Sensing. – 2008. – Vol. 34, № 2. – P.93–99.

Yang, X. Detection and characterization of coastal tidal wetland change in the northeastern US using Landsat time series / X. Yang, Z. Zhu, S. Qiu [et al.] // Remote sensing of environment. – 2022. – Vol. 276, № 113047.

Zhao, F. Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP) / F. Zhao, C. Huang, S. N. Goward [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 209. – P. 312–326.

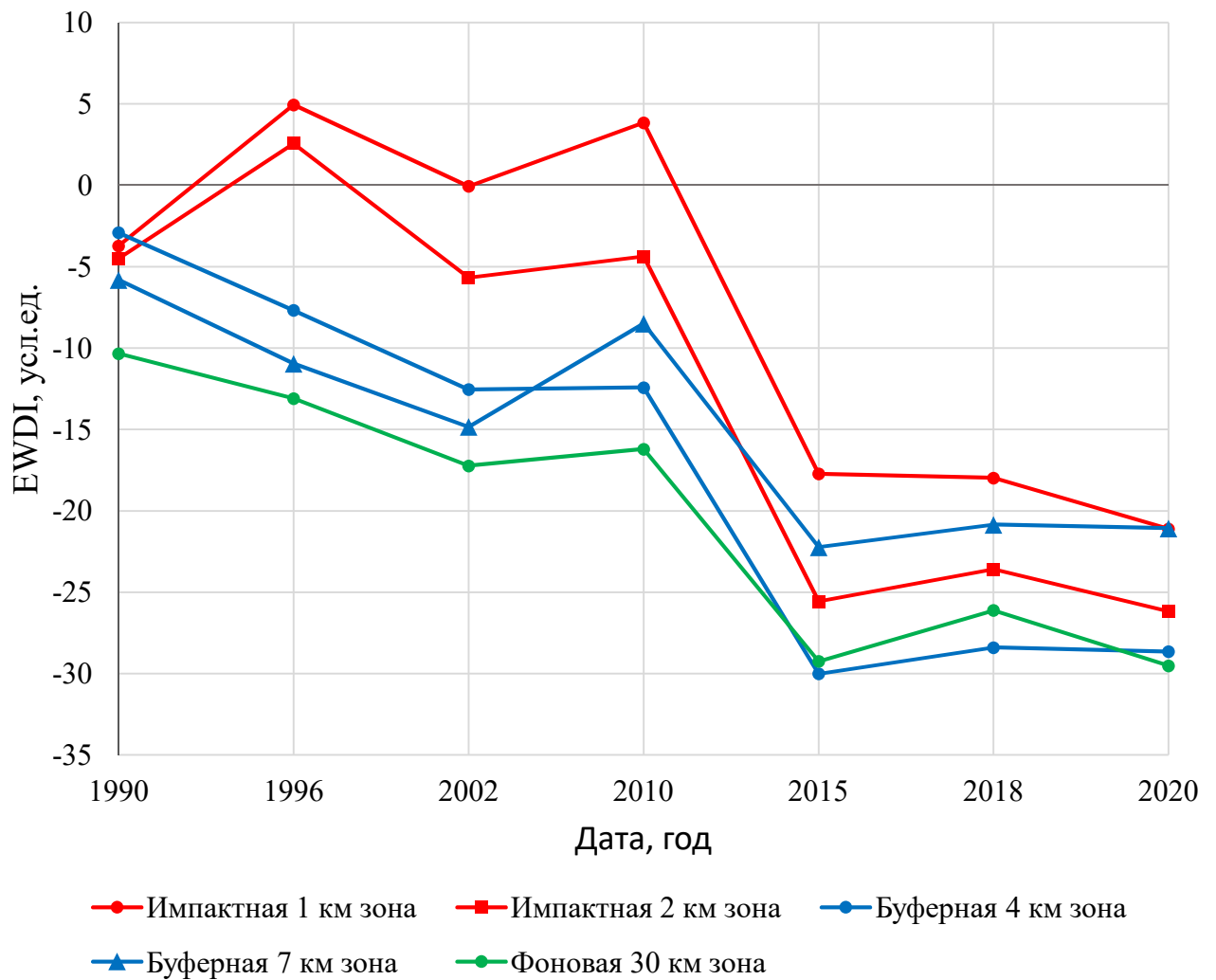
**Данные pH, фитотоксичности снеговой воды
и статистических параметров снегомерных исследований по площадкам**

№ площ.	Координаты		Запас снега, см ³	Запас талой воды, см ³	Значение pH снеговой воды	Коэффициент токсичности, усл. ед		Средняя высота снега, см	Дисперсия	Стандартное отклонение	Плотность снега
	x	y				K _{TR}	K _{TZF}				
1	10662,89	6297,45	8597	2560	5,09	-0,14	-0,03	61,50	7,90	2,80	0,30
2	10659,78	6298,03	8597	1825	6,94	-0,12	0,00	67,30	5,90	2,40	0,21
3	10681,89	6305,40	7785	1370	5,52	-0,09	-0,08	56,00	15,30	3,90	0,18
4	10706,13	6293,76	8071	1620	5,17	0,04	-0,15	59,30	2,80	1,70	0,20
5	10703,03	6293,38	9552	2050	5,18	0	-0,18	69,80	1,50	1,20	0,21
6	10696,05	6286,78	8167	1650	5,28	-0,17	-0,14	59,80	5,50	2,40	0,20
7	10695,46	6288,33	7737	1570	5,33	-0,10	-0,21	55,00	0,50	0,70	0,20
8	10696,82	6289,69	8215	1520	5,31	-0,10	-0,10	58,50	3,40	1,90	0,19
9	10700,89	6288,91	7403	1450	6,28	-0,16	-0,11	51,60	1,80	1,40	0,20
10	10693,33	6288,53	7976	1050	6,90	-0,16	-0,31	57,50	6,20	2,50	0,13
11	10689,65	6292,21	8501	1460	6,36	-0,25	-0,09	60,70	2,50	1,60	0,17
12	10687,90	6293,96	8979	1800	6,34	-0,23	-0,18	62,60	2,40	1,50	0,20
13	10686,93	6295,31	8406	1660	6,00	-0,08	0,04	58,30	1,00	1,00	0,20
14	10684,22	6294,93	8979	1640	5,88	-0,14	-0,11	63,50	0,70	0,90	0,18
15	10691,97	6289,30	7689	1600	6,40	-0,32	-0,03	52,70	2,20	1,50	0,21
16	10691,59	6288,91	8740	1840	6,65	-0,23	-0,39	61,80	4,40	2,10	0,21
17	10680,92	6307,14	6734	1580	6,64	-0,06	-0,11	46,70	0,80	0,90	0,23
18	10681,11	6307,14	7689	1610	6,62	-0,08	-0,12	53,90	0,50	0,70	0,21
19	10681,11	6308,31	7642	1550	6,75	-0,10	-0,05	53,70	0,50	0,70	0,20
20	10681,70	6306,17	8071	1725	6,75	-0,17	-0,09	56,10	1,60	1,30	0,21
21	10682,28	6304,82	8501	1790	6,92	-0,18	-0,18	59,80	1,80	1,30	0,21
22	10677,82	6305,20	7451	1500	6,62	-0,19	-0,24	52,80	2,60	1,60	0,20
23	10686,93	6296,67	8406	1820	6,81	-0,15	-0,12	59,70	4,50	2,10	0,22
24	10684,22	6300,74	9839	1680	6,26	-0,27	-0,05	67,90	1,80	1,30	0,17
25	10683,44	6301,52	8883	1940	6,48	-0,15	0,05	63,30	3,50	1,90	0,22
26	10685,19	6301,71	7451	1600	6,22	-0,18	-0,10	50,80	1,80	1,30	0,21
27	10687,32	6302,30	7260	1450	6,00	-0,27	-0,09	51,20	0,70	0,80	0,20
28	10682,67	6304,43	8024	1850	6,72	-0,18	-0,39	53,70	5,20	2,30	0,23
29	10678,01	6304,62	9504	2250	6,47	-0,20	-0,05	63,10	4,70	2,20	0,24
30	10684,02	6306,37	8740	2125	6,60	-0,17	-0,12	61,20	1,20	1,10	0,24
31	10686,74	6306,76	8406	2050	6,21	-0,12	-0,19	59,00	2,00	1,40	0,24
32	10686,93	6304,62	7403	1850	6,15	-0,18	-0,43	49,50	1,50	1,20	0,25

№ площ.	Координаты		Запас снега, см ³	Запас талой воды, см ³	Значение pH снеговой воды	Коэффициент токсичности, усл. ед		Средняя высота снега, см	Дисперсия	Стандартное отклонение	Плотность снега
	x	y				K _{TR}	K _{TZF}				
33	10689,26	6306,56	7164	1760	5,85	-0,29	-0,34	49,80	2,60	1,60	0,25
34	10706,91	6308,69	7068	1480	5,98	-0,21	-0,19	49,00	1,10	1,10	0,21
35	10700,70	6307,73	8406	1260	5,68	-0,26	-0,26	59,80	2,80	1,70	0,15
36	10695,08	6308,69	6973	1220	5,70	-0,26	-0,37	50,00	2,50	1,60	0,17
37	10694,88	6311,60	8692	1910	5,88	0,03	-0,10	60,40	3,10	1,80	0,22
38	10689,26	6307,34	8788	2010	6,02	-0,46	-0,38	63,40	2,50	1,60	0,23
39	10685,57	6309,86	6973	1520	6,41	-0,27	-0,09	49,50	3,20	1,80	0,22
40	10685,19	6312,96	9074	1580	6,18	-0,25	-0,15	63,90	2,20	1,50	0,17
41	10683,44	6315,48	8024	1330	5,82	-0,24	-0,24	55,70	4,90	2,20	0,17
42	10680,92	6318,78	7546	1420	6,11	-0,03	-0,14	53,10	13,50	3,70	0,19
43	10676,27	6318,20	7546	1140	6,07	-0,16	-0,13	53,50	4,00	2,00	0,15
44	10664,44	6313,74	9456	1275	6,26	-0,14	-0,14	64,80	3,30	1,80	0,13
45	10659,39	6306,95	9982	2050	6,20	-0,14	-0,13	68,50	1,40	1,20	0,21
46	10660,17	6304,04	8788	1840	6,42	-0,11	-0,29	62,90	1,50	1,20	0,21
47	10671,61	6306,17	9361	2125	6,20	-0,06	-0,10	66,20	2,90	1,70	0,23
48	10665,99	6307,34	11749	2290	6,55	-0,11	-0,21	82,80	4,90	2,20	0,19
49	10676,07	6292,02	8310	1775	5,84	-0,02	-0,13	58,40	3,20	1,80	0,21
50	10701,67	6310,44	6973	1500	6,30	-0,06	-0,06	49,00	1,80	1,40	0,22
51	10702,64	6311,22	5636	1225	5,99	-0,14	-0,23	39,20	1,00	1,00	0,22
52	10702,64	6312,77	6161	1500	6,17	-0,14	-0,14	42,60	1,90	1,40	0,24
53	10660,36	6298,03	8597	2150	6,34	-0,04	-0,02	60,00	21,38	4,62	0,25
54	10680,92	6307,92	8597	1950	6,37	-0,04	-0,36	60,07	10,69	3,27	0,23

Статистические показатели усовершенствованного индекса влажности EWDI для еловых насаждений в зонах на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода

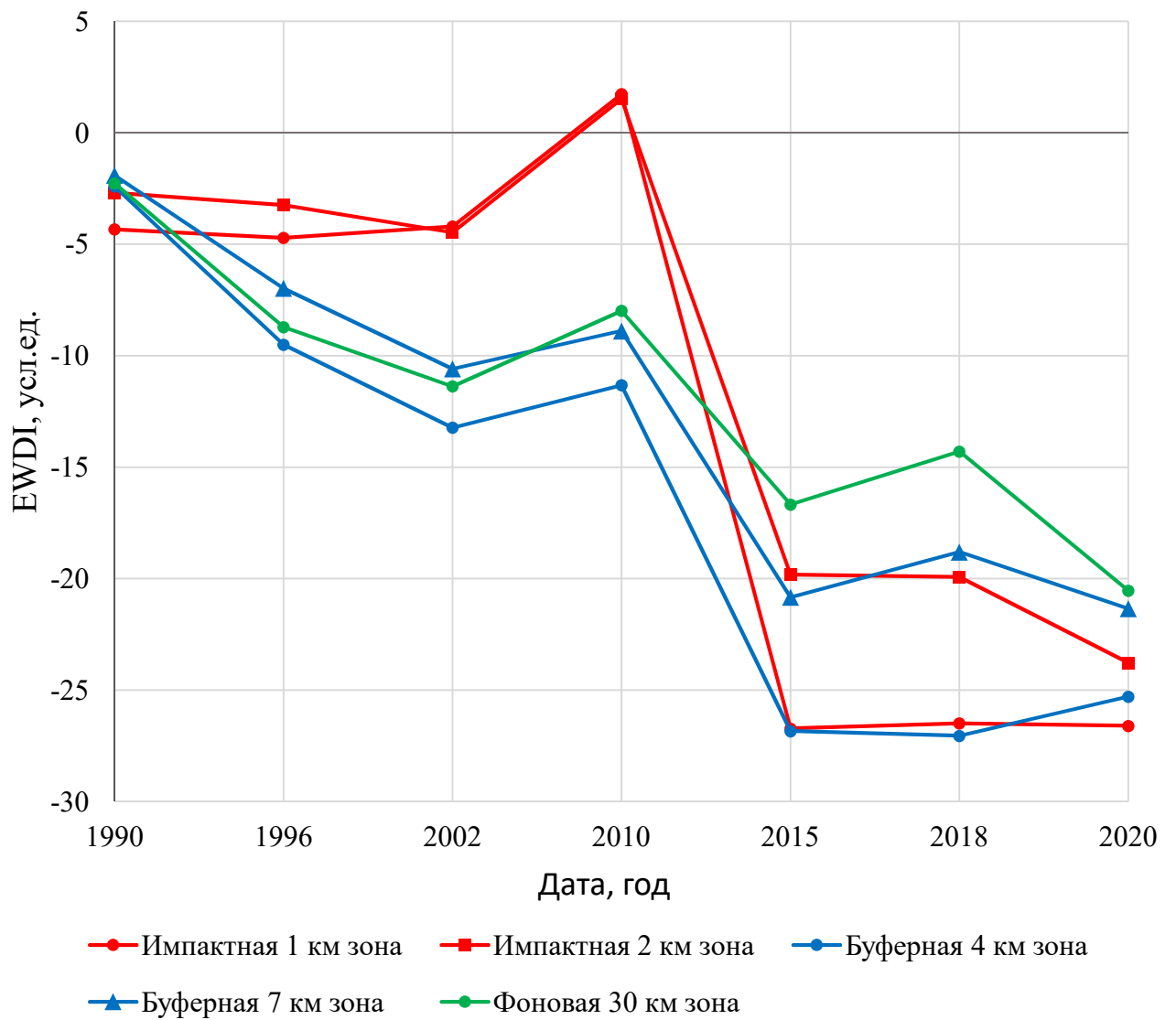
Параметр	Значение показателя по годам						
	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Импактная 1 км зона							
Количество участков	10	10	10	10	10	10	10
Минимальное значение	-30,27	-26,53	-35,75	-35,26	-66,06	-50,84	-59,86
Максимальное значение	-3,06	44,35	37,15	62,38	18,55	21,69	8,06
Среднее значение	-3,72	4,95	-0,05	3,85	-17,72	-17,97	-21,10
Стандартное отклонение	2,45	4,45	2,25	3,43	18,24	15,28	20,58
Коэффициент вариации	-0,66	0,9	-45,0	0,89	-1,03	-0,85	-0,97
Ошибка среднего	0,77	1,41	0,71	1,08	5,77	4,83	6,51
Импактная 2 км зона							
Количество участков	38	38	38	38	38	38	38
Минимальное значение	-33,12	-31,09	-42,91	-38,91	-67,92	-67,00	-75,86
Максимальное значение	8,19	58,50	56,51	62,64	23,57	18,12	-3,55
Среднее значение	-4,50	2,57	-5,67	-4,36	-25,56	-23,57	-26,17
Стандартное отклонение	3,77	1,88	4,06	3,44	15,25	14,54	13,16
Коэффициент вариации	-0,84	0,73	-0,72	-0,79	-0,6	-0,62	-0,5
Ошибка среднего	0,61	0,30	0,66	0,56	2,47	2,36	2,13
Буферная 4 км зона							
Количество участков	165	165	165	165	165	165	165
Минимальное значение	-26,62	-46,63	-50,73	-49,27	-68,62	-62,33	-72,67
Максимальное значение	28,60	70,62	73,85	37,65	-12,44	-4,71	9,72
Среднее значение	-2,91	-7,68	-12,54	-12,42	-30,00	-28,39	-28,64
Стандартное отклонение	2,61	7,62	8,38	12,04	11,07	10,88	12,98
Коэффициент вариации	-0,89	-0,99	-0,67	-0,97	-0,37	-0,38	-0,45
Ошибка среднего	0,20	0,59	0,65	0,94	0,86	0,85	1,01
Буферная 7 км зона							
Количество участков	269	269	269	269	269	269	269
Минимальное значение	-84,92	-86,60	-80,78	-85,95	-112,05	-102,14	-103,38
Максимальное значение	80,25	58,89	31,99	96,13	48,39	29,03	35,04
Среднее значение	-5,80	-10,95	-14,83	-8,49	-22,22	-20,84	-21,07
Стандартное отклонение	4,49	10,71	13,86	7,77	17,64	16,03	17,62
Коэффициент вариации	-0,77	-0,98	-0,93	-0,92	-0,79	-0,77	-0,84
Ошибка среднего	0,27	0,65	0,85	0,47	1,08	0,98	1,07
Фоновая 30 км зона							
Количество участков	4067	4067	4067	4067	4067	4067	4067
Минимальное значение	-191,75	-139,23	-159,85	-177,48	-195,72	-182,07	-165,59
Максимальное значение	102,32	95,39	104,65	92,80	97,13	121,90	195,13
Среднее значение	-10,33	-13,09	-17,23	-16,20	-29,24	-26,11	-29,51
Стандартное отклонение	9,69	12,19	16,69	14	26,38	25,13	25,49
Коэффициент вариации	-0,94	-0,93	-0,97	-0,86	-0,9	-0,96	-0,86
Ошибка среднего	0,15	0,19	0,26	0,22	0,41	0,39	0,40



Графики изменения значений индекса EWDI для еловых насаждений в разных зонах аэропромышленного загрязнения

Статистические показатели усовершенствованного индекса влажности EWDI для
пихтовых насаждений в зонах на разном удалении от Среднеуральского
медеплавильного завода

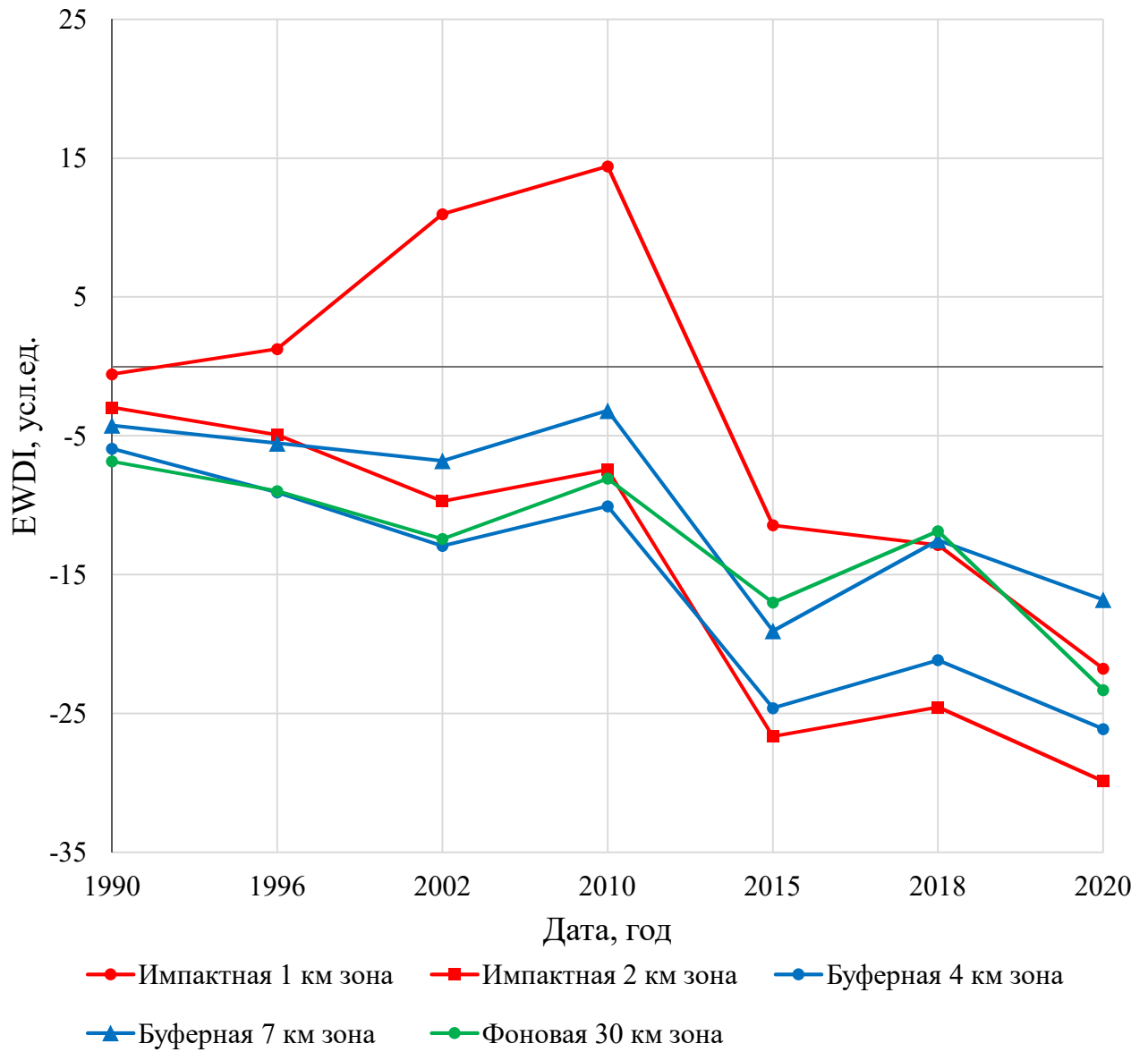
Параметр	Значение показателя по годам						
	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Импактная 1 км зона							
Количество участков	5	5	5	5	5	5	5
Минимальное значение	-19,76	-22,90	-33,21	-38,76	-56,85	-59,66	-59,79
Максимальное значение	-3,63	0,72	47,36	68,86	-2,67	7,35	3,64
Среднее значение	-4,33	-4,71	-4,20	1,74	-26,72	-26,49	-26,60
Стандартное отклонение	2,99	3,91	5,62	10,46	17,99	21,55	20,48
Коэффициент вариации	-0,69	-0,83	-1,34	6,01	-0,67	-0,81	-0,77
Ошибка среднего	1,34	1,75	2,51	4,68	8,05	9,64	9,16
Импактная 2 км зона							
Количество участков	18	18	18	18	18	18	18
Минимальное значение	-23,67	-18,29	-27,83	-27,68	-38,46	-39,19	-40,70
Максимальное значение	8,11	42,90	30,83	47,90	11,17	10,43	-0,68
Среднее значение	-2,69	-3,24	-4,47	1,52	-19,82	-19,93	-23,77
Стандартное отклонение	2,34	4,26	4,86	1,17	14,51	13,65	9,16
Коэффициент вариации	-0,87	-1,31	-1,09	0,77	-0,73	-0,68	-0,39
Ошибка среднего	0,55	1,00	1,15	0,28	3,42	3,22	2,16
Буферная 4 км зона							
Количество участков	29	29	29	29	29	29	29
Минимальное значение	-23,09	-26,87	-36,01	-29,27	-46,34	-46,84	-48,46
Максимальное значение	11,40	17,68	20,63	-0,63	-15,79	-15,28	-13,30
Среднее значение	-2,40	-9,50	-13,22	-11,32	-26,84	-27,05	-25,29
Стандартное отклонение	2,65	10,63	11,86	7,19	7,11	7,86	8,76
Коэффициент вариации	-1,1	-1,12	-0,9	-0,64	-0,26	-0,29	-0,35
Ошибка среднего	0,49	1,97	2,20	1,34	1,32	1,46	1,63
Буферная 7 км зона							
Количество участков	303	303	303	303	303	303	303
Минимальное значение	-19,51	-52,05	-55,54	-68,37	-89,25	-87,87	-94,38
Максимальное значение	23,07	16,25	62,28	35,23	37,00	61,19	33,70
Среднее значение	-1,90	-6,97	-10,58	-8,88	-20,83	-18,80	-21,34
Стандартное отклонение	2,92	9,94	14,64	11,92	15,16	14,75	14,44
Коэффициент вариации	-1,54	-1,43	-1,38	-1,34	-0,73	-0,78	-0,68
Ошибка среднего	0,17	0,57	0,84	0,68	0,87	0,85	0,83
Фоновая 30 км зона							
Количество участков	680	680	680	680	680	680	680
Минимальное значение	-52,58	-101,85	-104,67	-95,07	-109,51	-110,71	-113,26
Максимальное значение	110,40	121,16	81,92	101,98	82,85	141,48	83,05
Среднее значение	-2,26	-8,71	-11,37	-7,98	-16,67	-14,29	-20,54
Стандартное отклонение	4,39	15,02	17,34	16,78	24,93	28,51	17,96
Коэффициент вариации	-1,94	-1,72	-1,53	-2,1	-1,5	-2	-0,87
Ошибка среднего	0,17	0,58	0,66	0,64	0,96	1,09	0,69



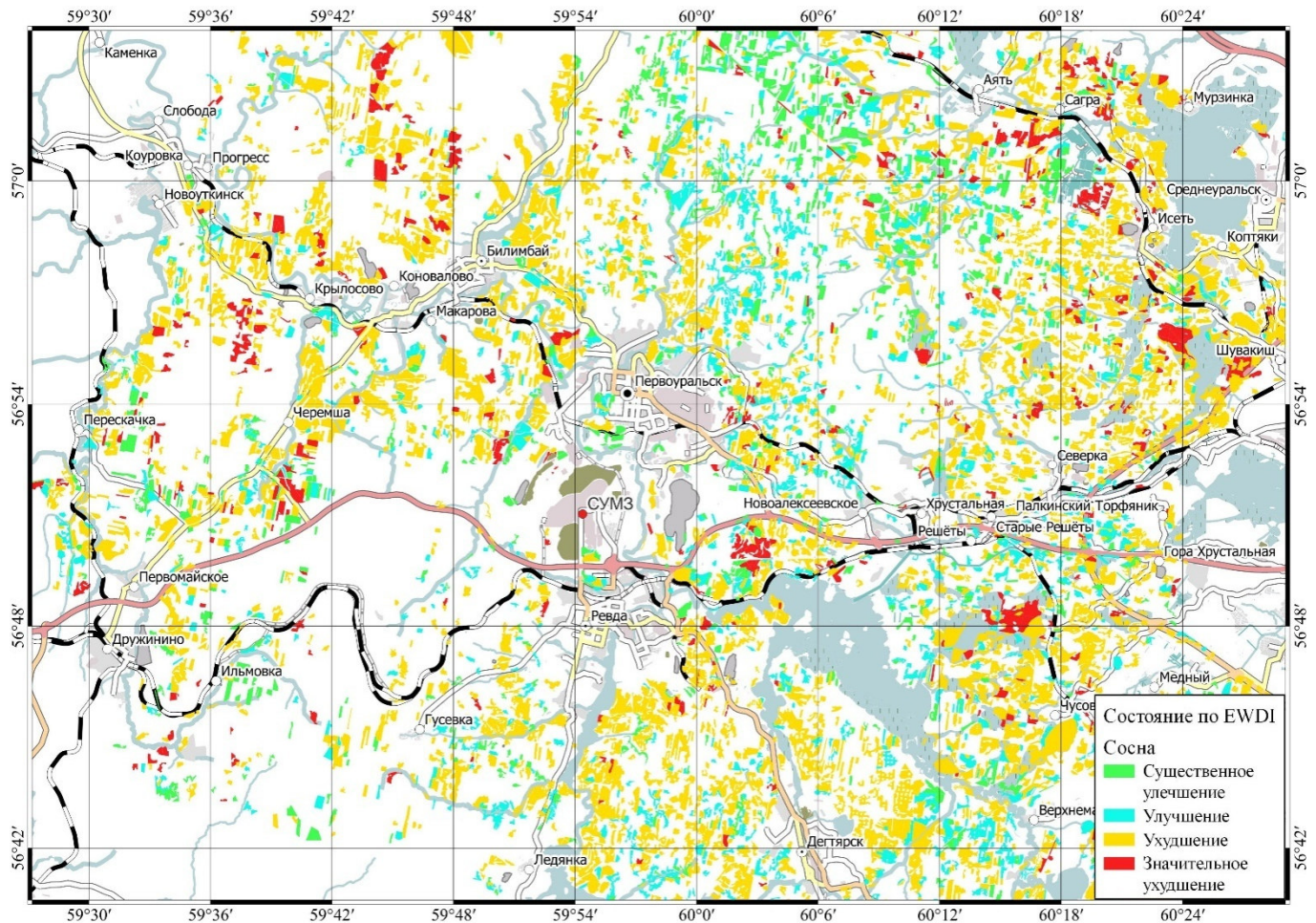
Графики изменения значений индекса EWDI для пихтовых насаждений в разных зонах аэропромышленного загрязнения

Статистические показатели усовершенствованного индекса влажности EWDI для
осиновых насаждений в зонах на разном удалении от Среднеуральского
медеплавильного завода

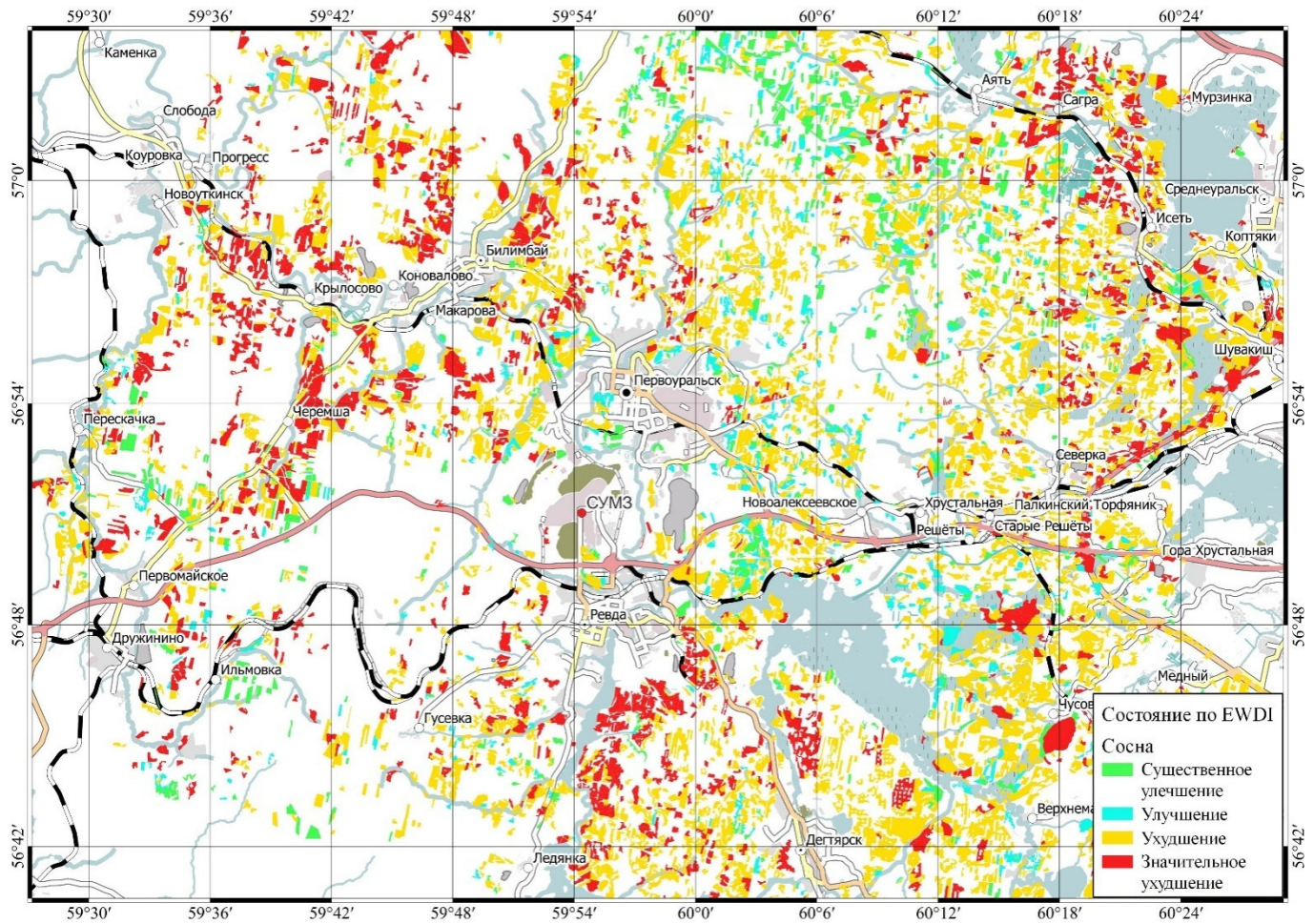
Параметр	Значение показателя по годам						
	1990	1996	2002	2010	2015	2018	2020
Импактная 1 км зона							
Количество участков	5	5	5	5	5	5	5
Минимальное значение	-20,00	-7,33	-2,93	8,02	-13,76	-16,64	-25,76
Максимальное значение	3,61	13,55	31,26	29,41	-10,38	-5,76	-15,80
Среднее значение	-0,56	1,26	10,97	14,42	-11,43	-12,86	-21,77
Стандартное отклонение	0,31	0,62	8,15	7,94	1,24	4,52	3,3
Коэффициент вариации	-0,55	0,49	0,74	0,55	-0,11	-0,35	-0,15
Ошибка среднего	0,14	0,28	3,64	3,55	0,55	2,02	1,48
Импактная 2 км зона							
Количество участков	12	12	12	12	12	12	12
Минимальное значение	-10,48	-32,46	-32,86	-49,42	-91,09	-87,60	-94,40
Максимальное значение	14,47	35,35	22,57	36,33	-5,29	-4,62	-4,27
Среднее значение	-2,95	-4,93	-9,70	-7,41	-26,64	-24,53	-29,87
Стандартное отклонение	1,82	3,32	8,87	9,08	21,63	20,17	21,01
Коэффициент вариации	-0,62	-0,67	-0,91	-1,23	-0,81	-0,82	-0,7
Ошибка среднего	0,53	0,96	2,56	2,62	6,24	5,82	6,07
Буферная 4 км зона							
Количество участков	21	21	21	21	21	21	21
Минимальное значение	-10,67	-29,23	-31,59	-30,75	-48,85	-47,16	-49,23
Максимальное значение	29,56	5,57	7,54	2,78	-9,23	-1,15	-13,57
Среднее значение	-5,92	-9,06	-12,92	-10,06	-24,60	-21,15	-26,11
Стандартное отклонение	10,32	8,90	10,10	10,12	10,94	12,59	10,84
Коэффициент вариации	1,74	-0,98	-0,78	-1,01	-0,44	-0,60	-0,42
Ошибка среднего	2,25	1,94	2,20	2,21	2,39	2,75	2,37
Буферная 7 км зона							
Количество участков	116	116	116	116	116	116	116
Минимальное значение	-11,02	-38,58	-39,93	-48,42	-71,96	-60,69	-65,00
Максимальное значение	44,03	10,68	18,32	23,67	0,97	80,29	46,96
Среднее значение	-4,24	-5,53	-6,79	-3,17	-19,04	-12,51	-16,80
Стандартное отклонение	3,13	4,83	5,81	2,31	10,77	11,95	13,46
Коэффициент вариации	-0,74	-0,87	-0,86	-0,73	-0,57	-0,96	-0,8
Ошибка среднего	0,29	0,45	0,54	0,21	1,00	1,11	1,25
Фоновая 30 км зона							
Количество участков	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984
Минимальное значение	-104,16	-105,25	-124,28	-134,04	-126,80	-117,59	-121,50
Максимальное значение	75,79	42,27	79,45	164,38	141,07	138,77	140,77
Среднее значение	-6,84	-8,97	-12,42	-8,07	-17,00	-11,86	-23,30
Стандартное отклонение	6,8	7,79	11,31	7,22	16,32	10,67	17,93
Коэффициент вариации	-0,99	-0,87	-0,91	-0,89	-0,96	-0,9	-0,77
Ошибка среднего	0,15	0,17	0,25	0,16	0,37	0,24	0,40



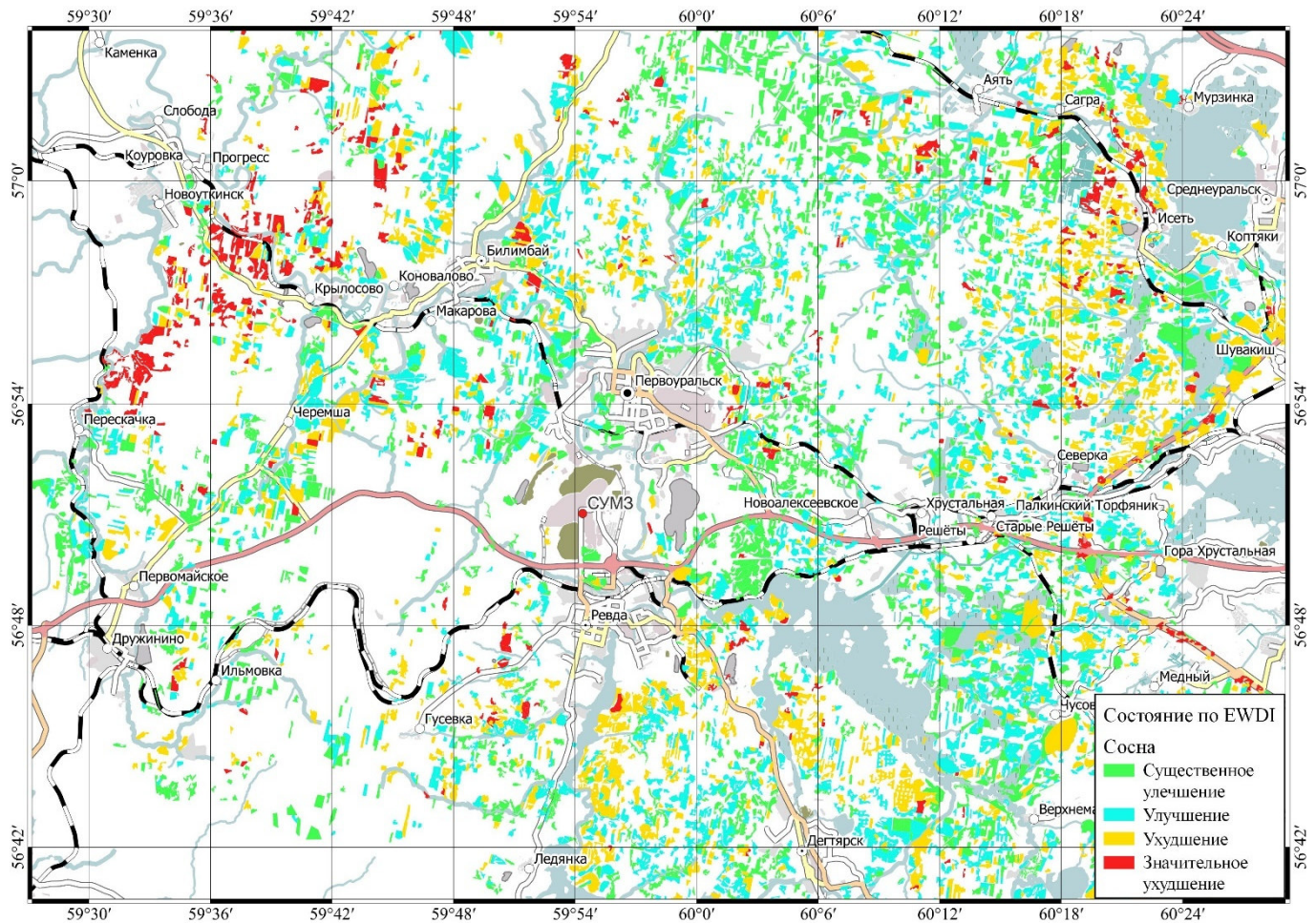
Графики изменения значений индекса EWDI для осиновых насаждений в разных зонах аэропромышленного загрязнения



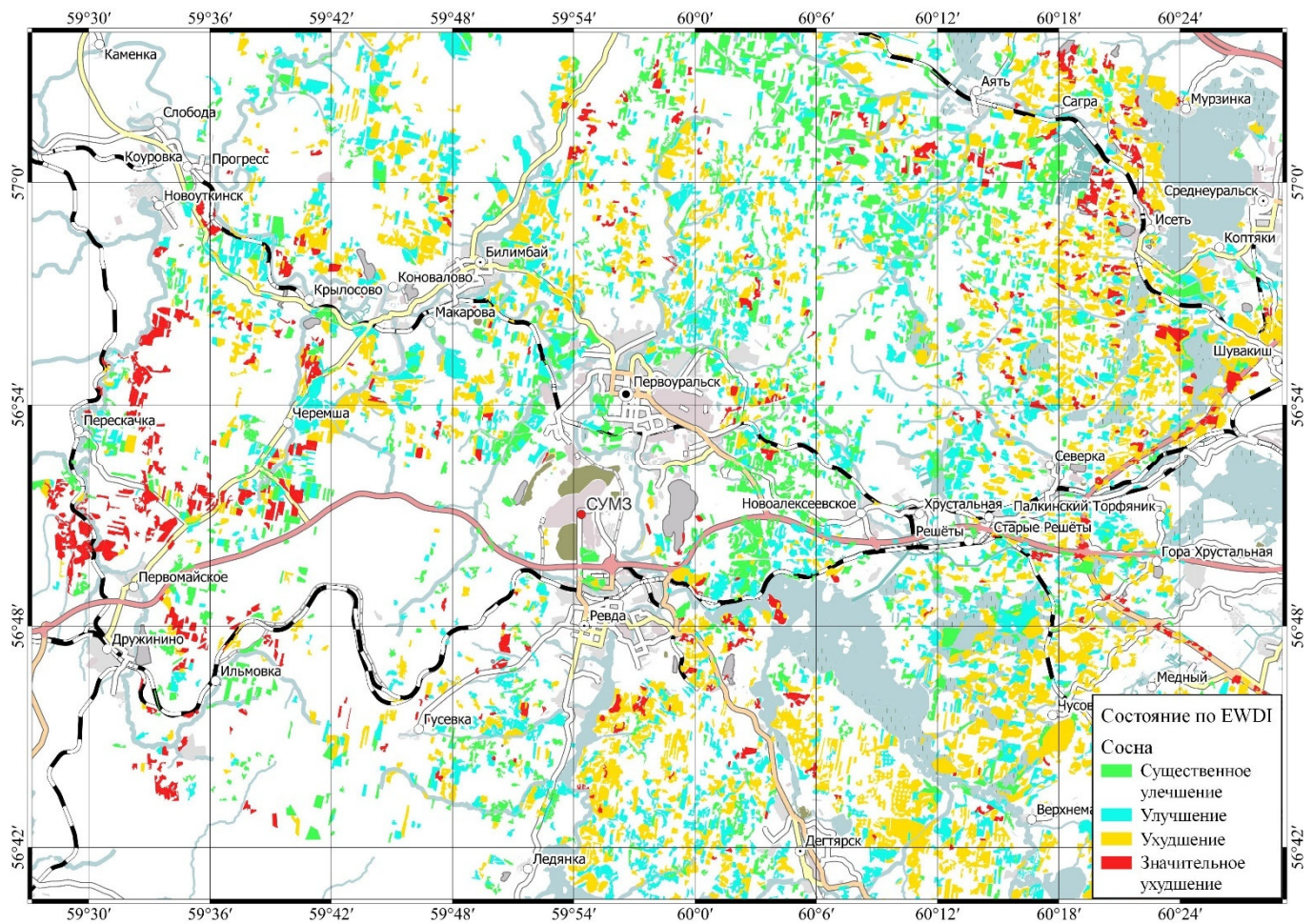
Картосхема состояния сосновых насаждений в 2002 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



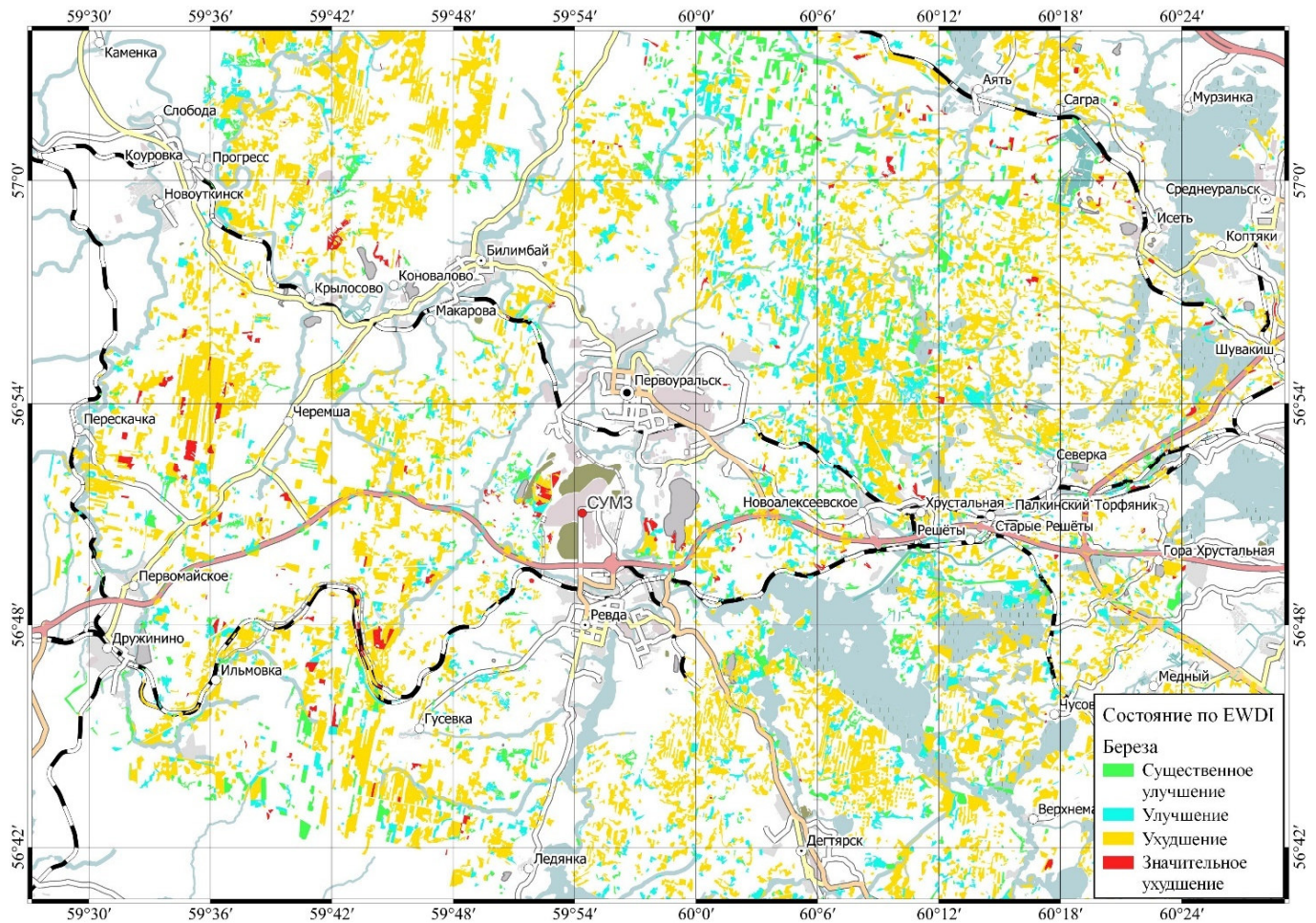
Картосхема состояния сосновых насаждений в 2010 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



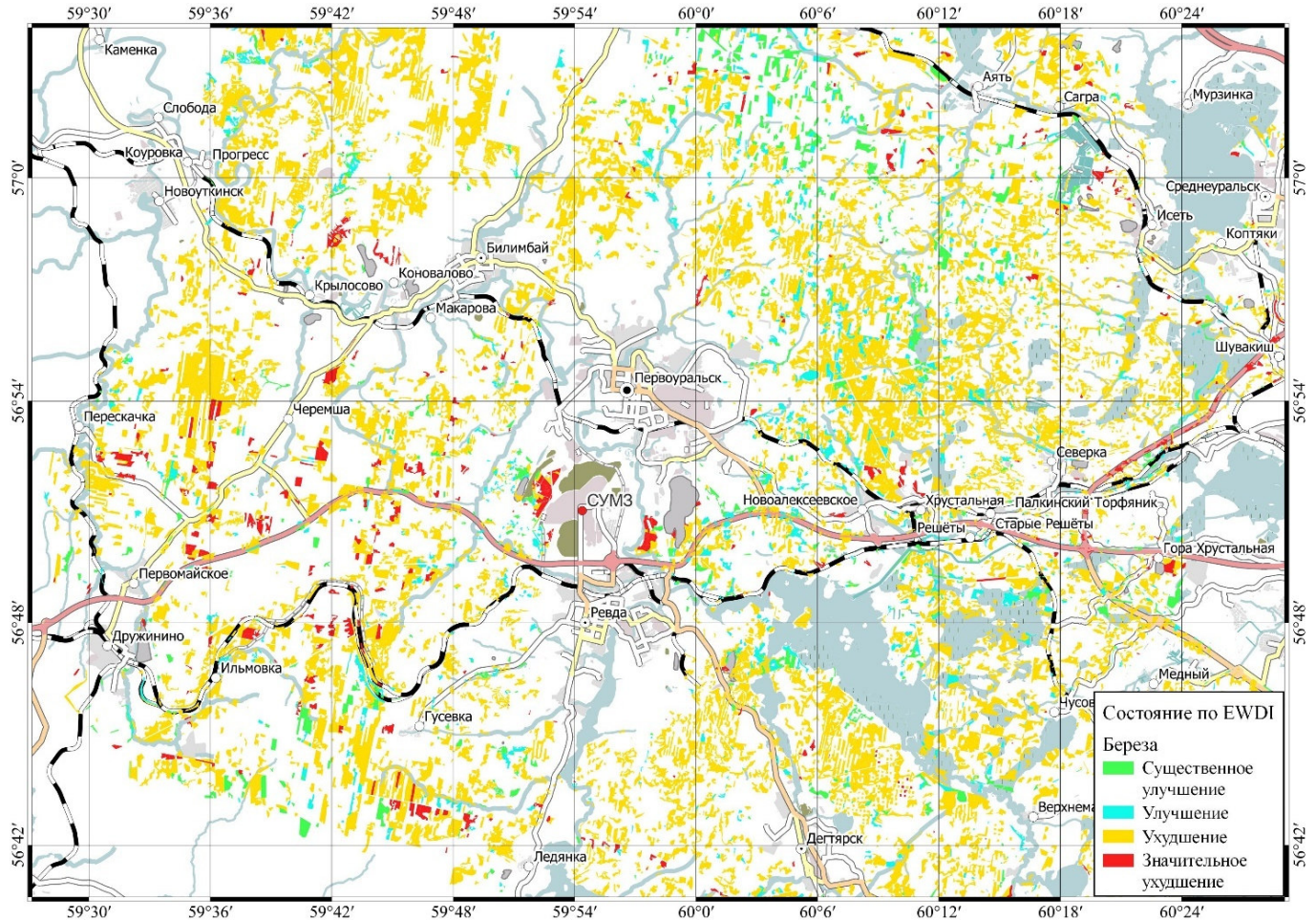
Картосхема состояния сосновых насаждений в 2015 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



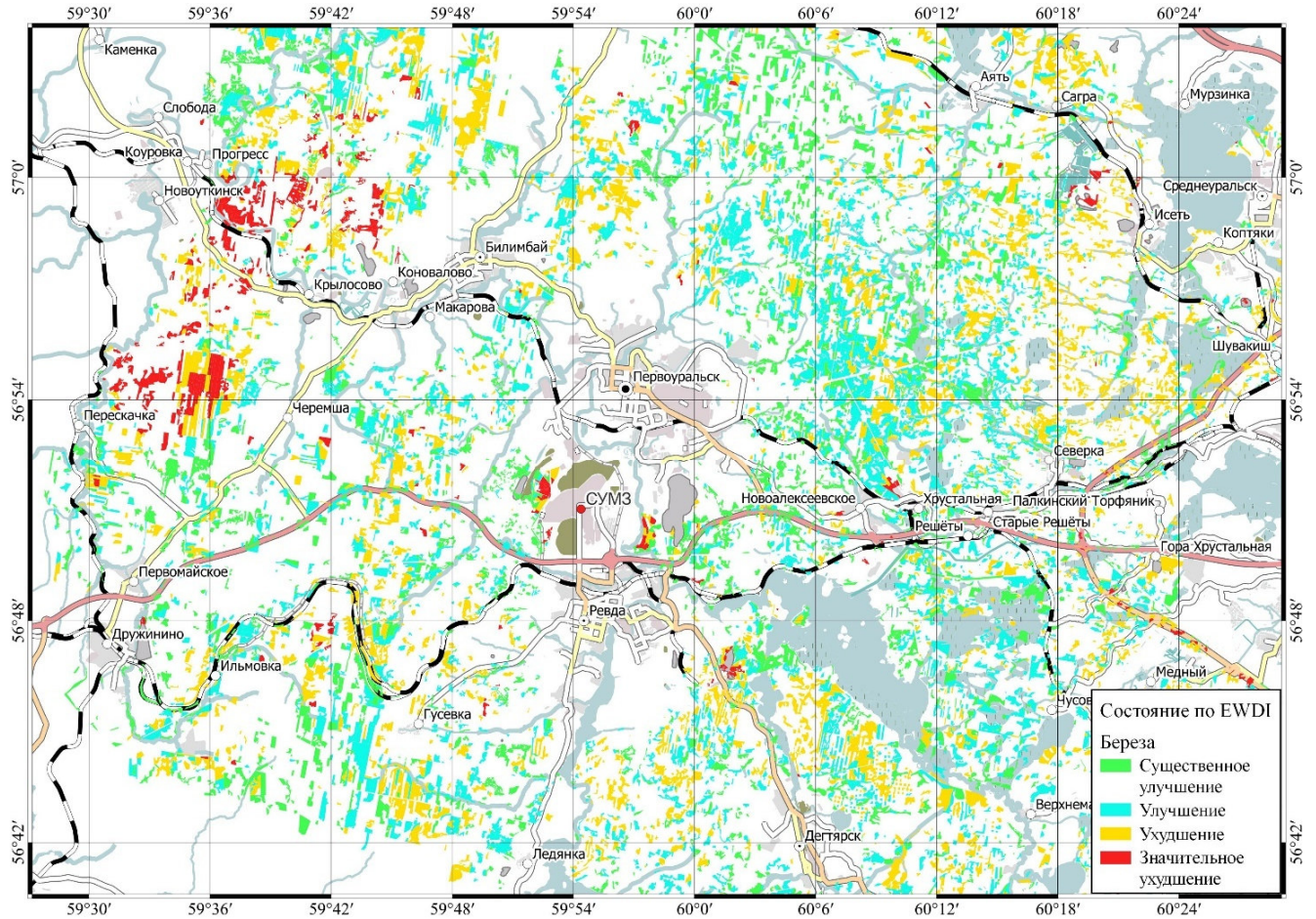
Картосхема состояния сосновых насаждений в 2018 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



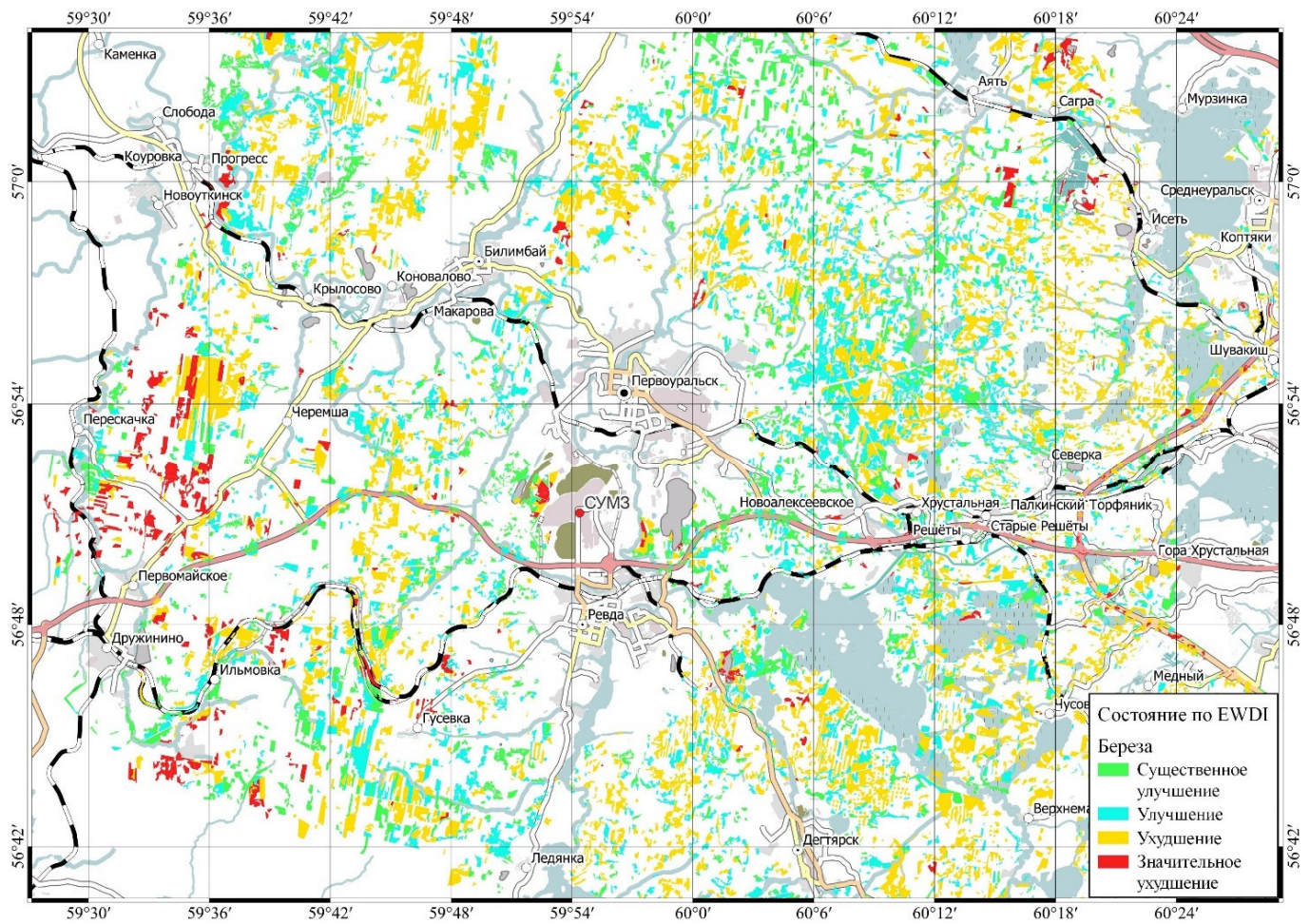
Картосхема состояния березовых насаждений в 2002 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



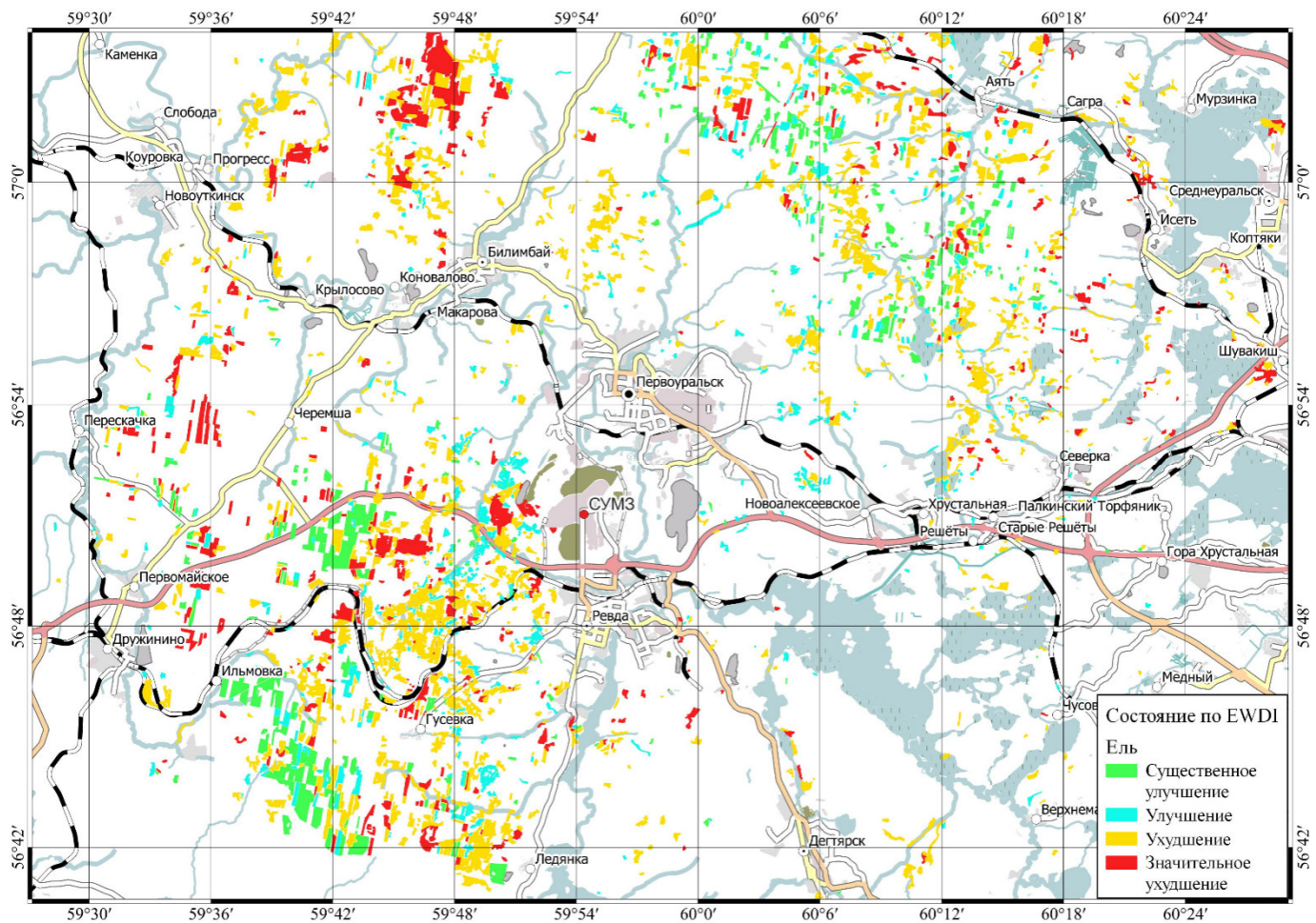
Картосхема состояния березовых насаждений в 2010 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



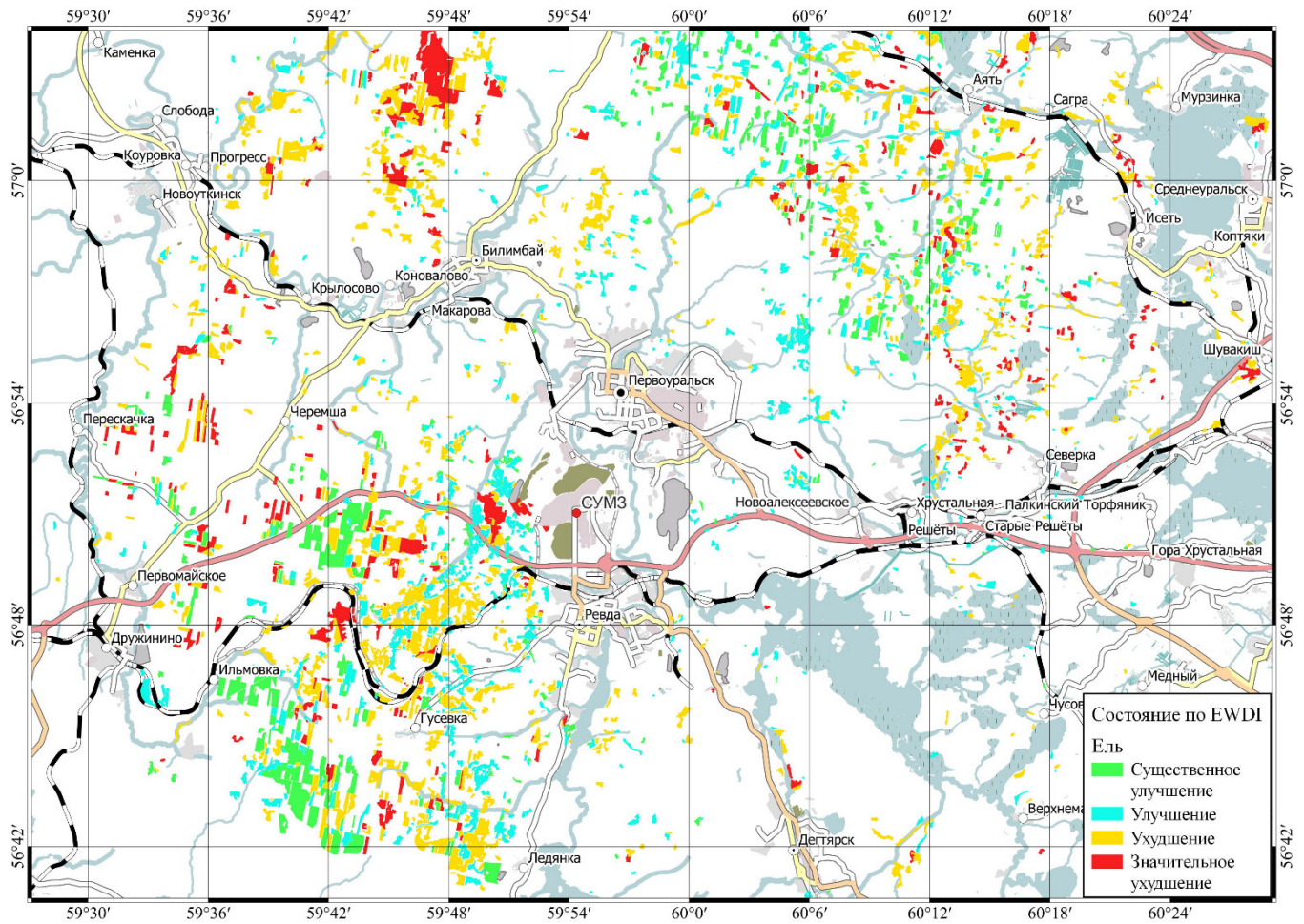
Картосхема состояния березовых насаждений в 2015 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



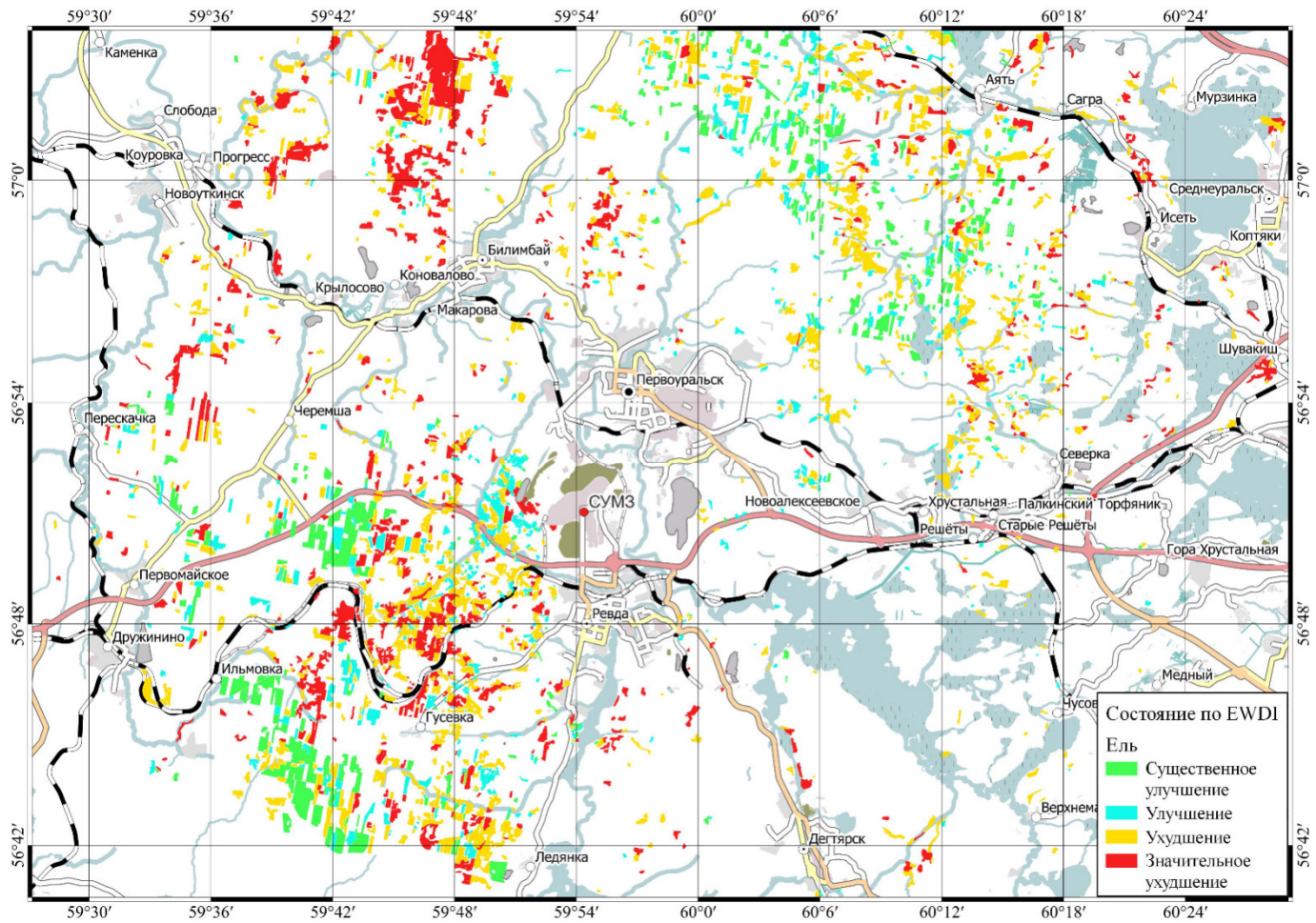
Картосхема состояния березовых насаждений в 2018 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



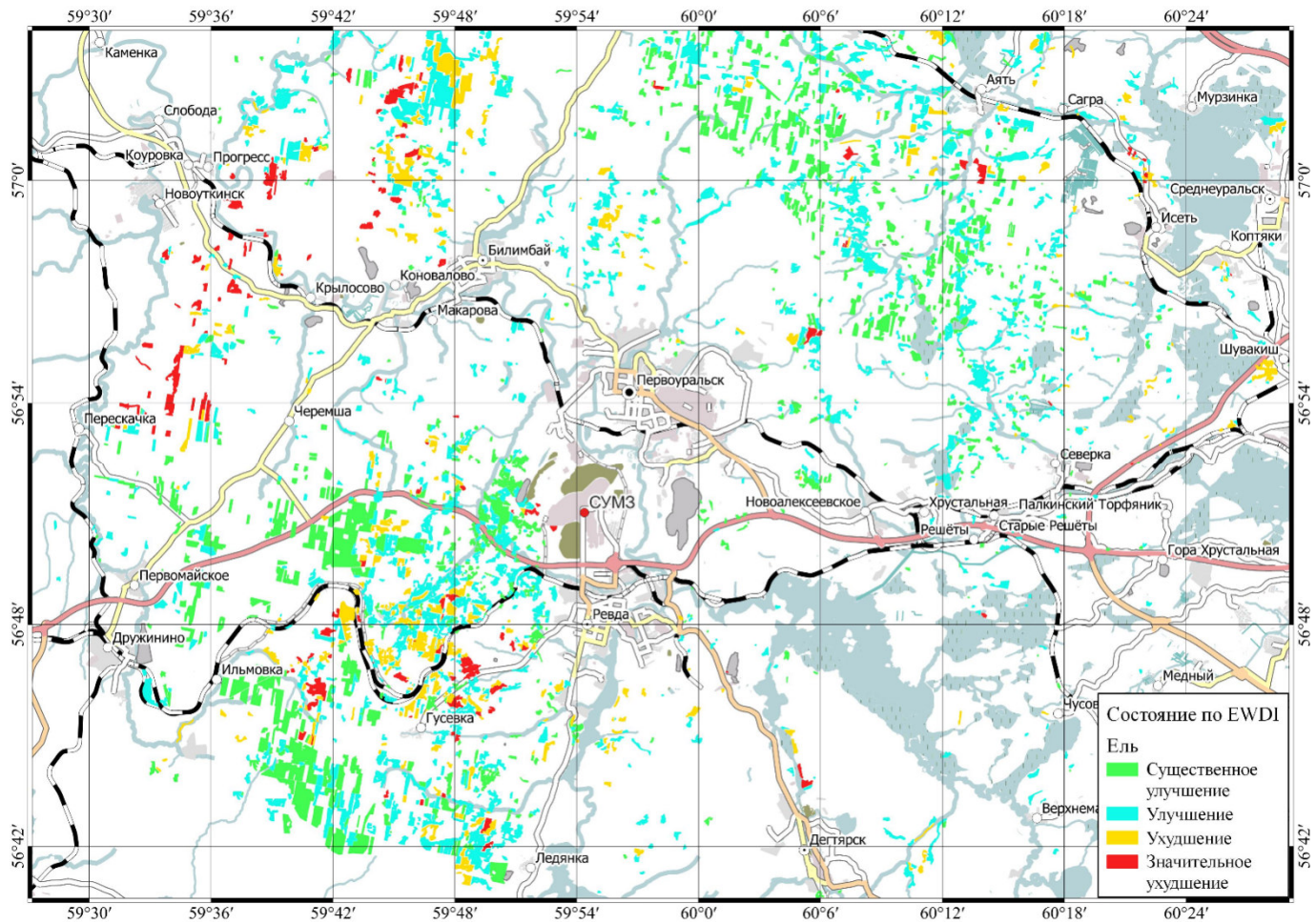
Картосхема состояния еловых насаждений в 1996 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



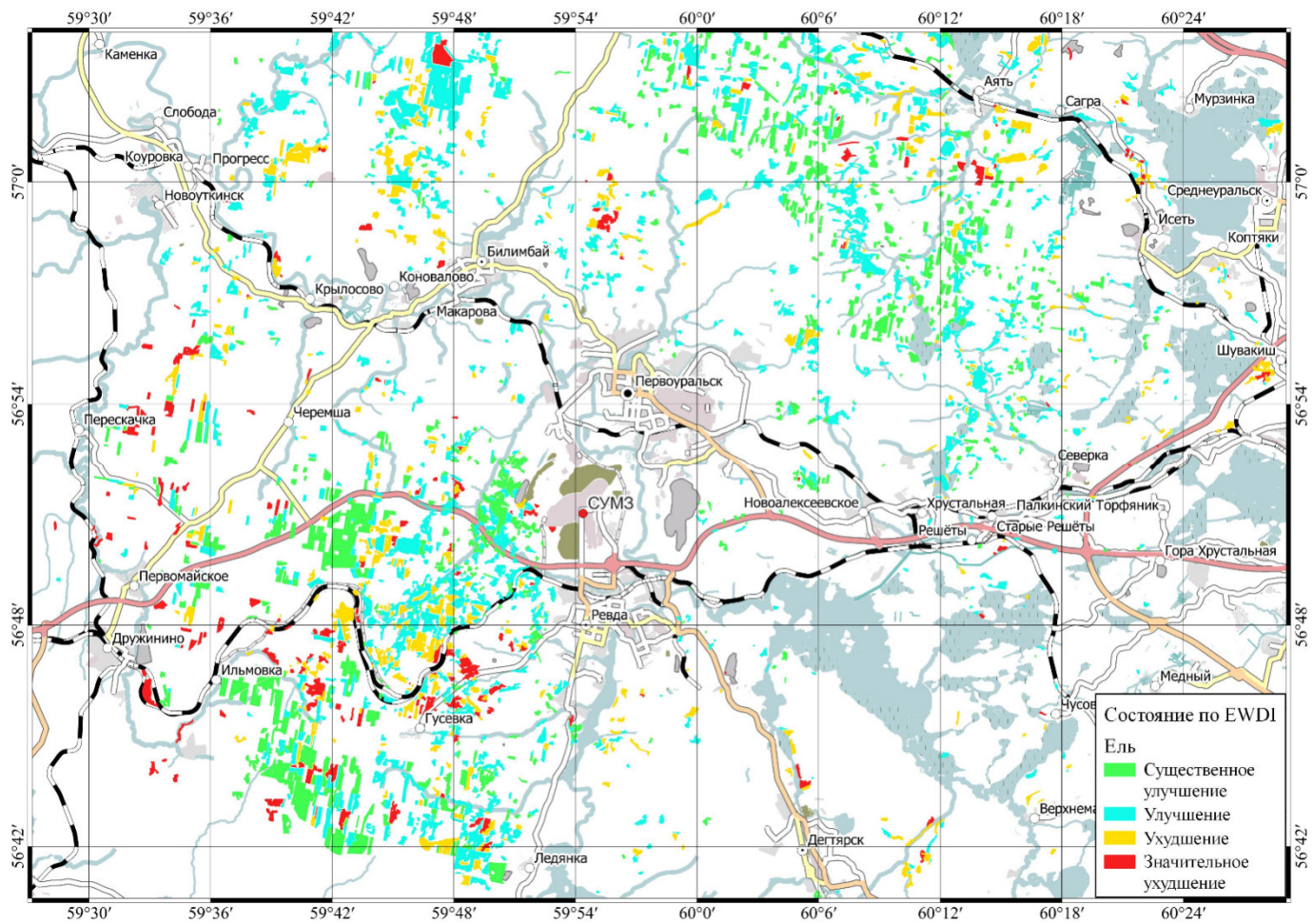
Картосхема состояния еловых насаждений в 2002 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



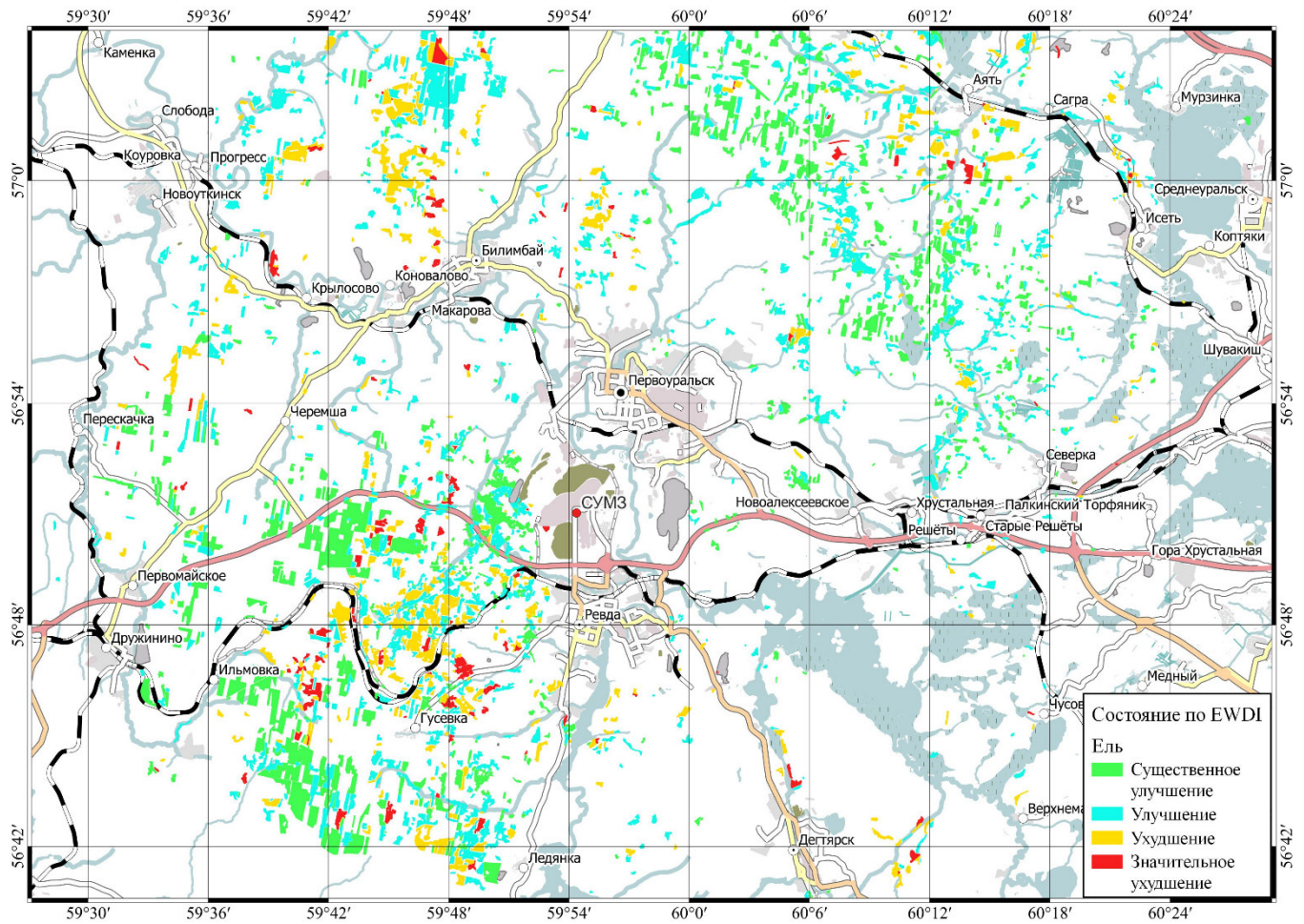
Картосхема состояния еловых насаждений в 2010 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



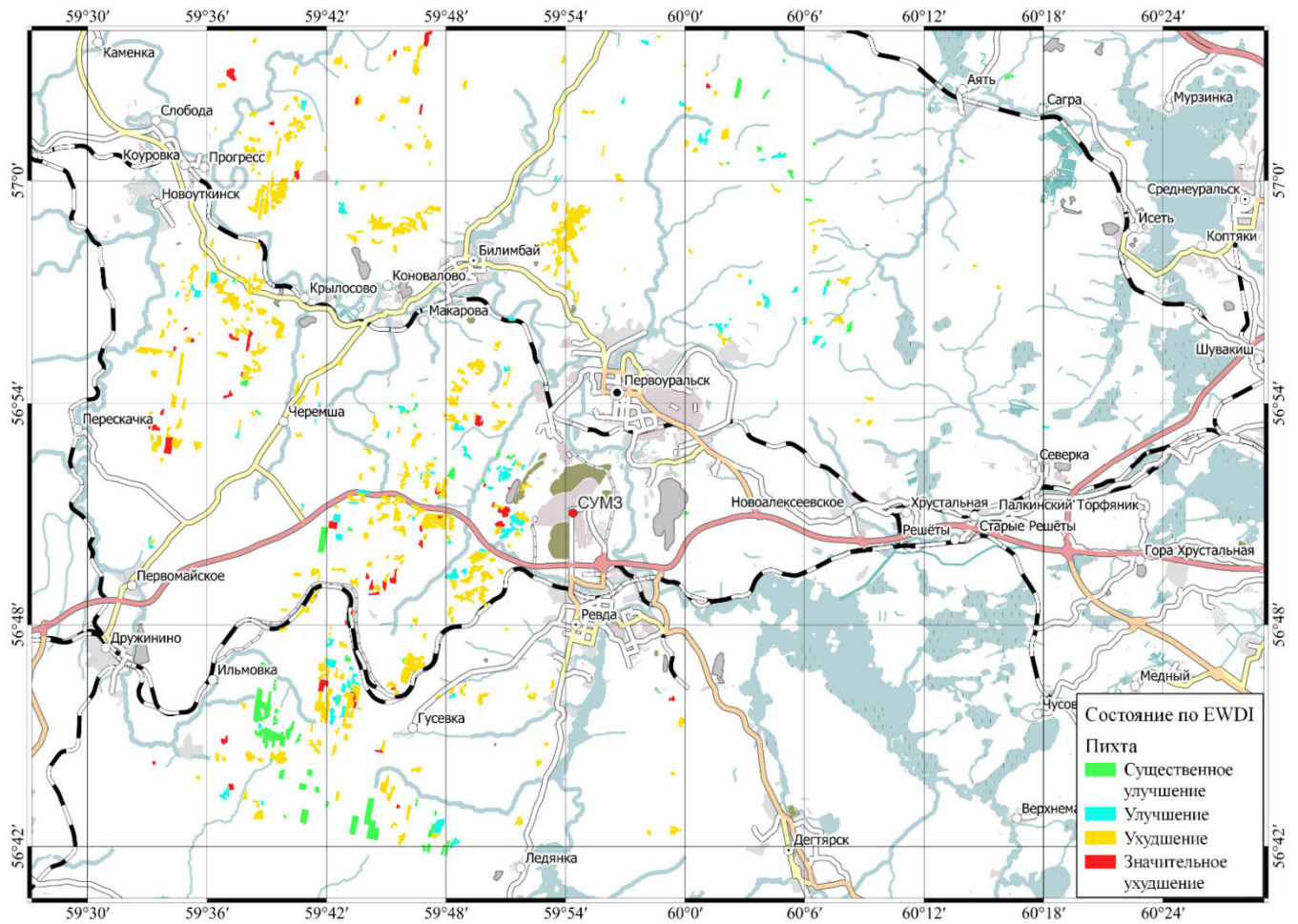
Картосхема состояния еловых насаждений в 2015 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



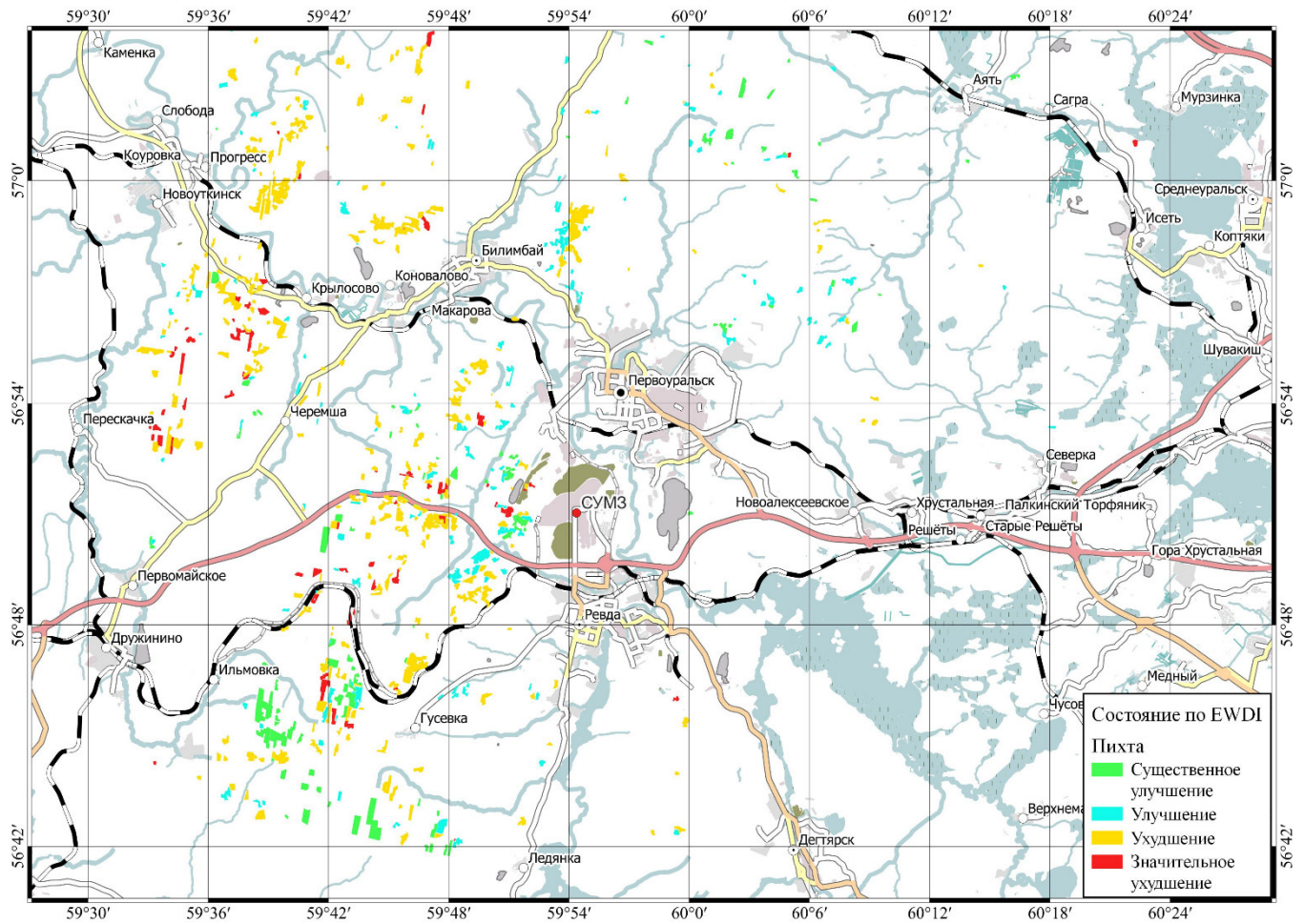
Картосхема состояния еловых насаждений в 2018 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



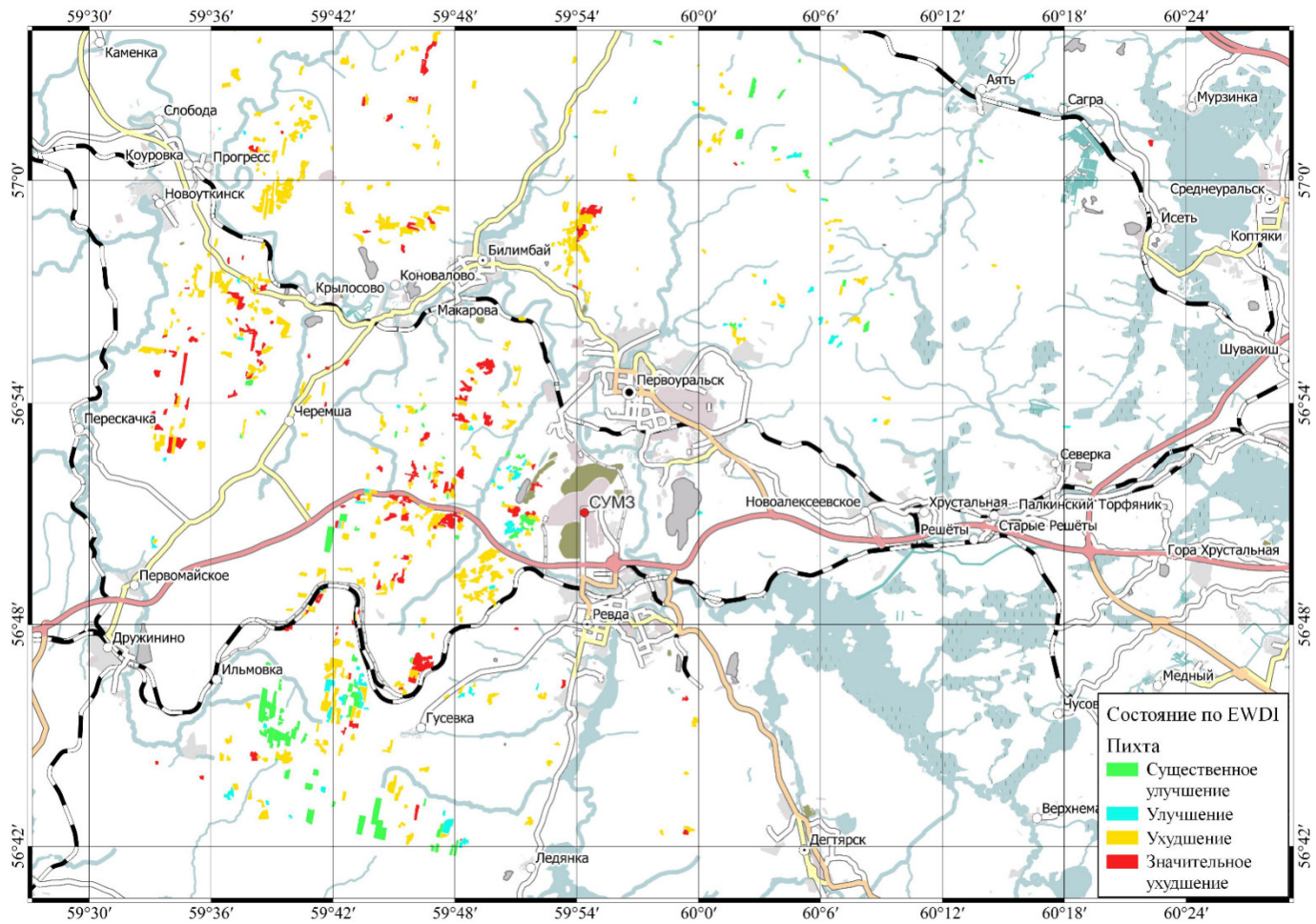
Картосхема состояния еловых насаждений в 2020 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



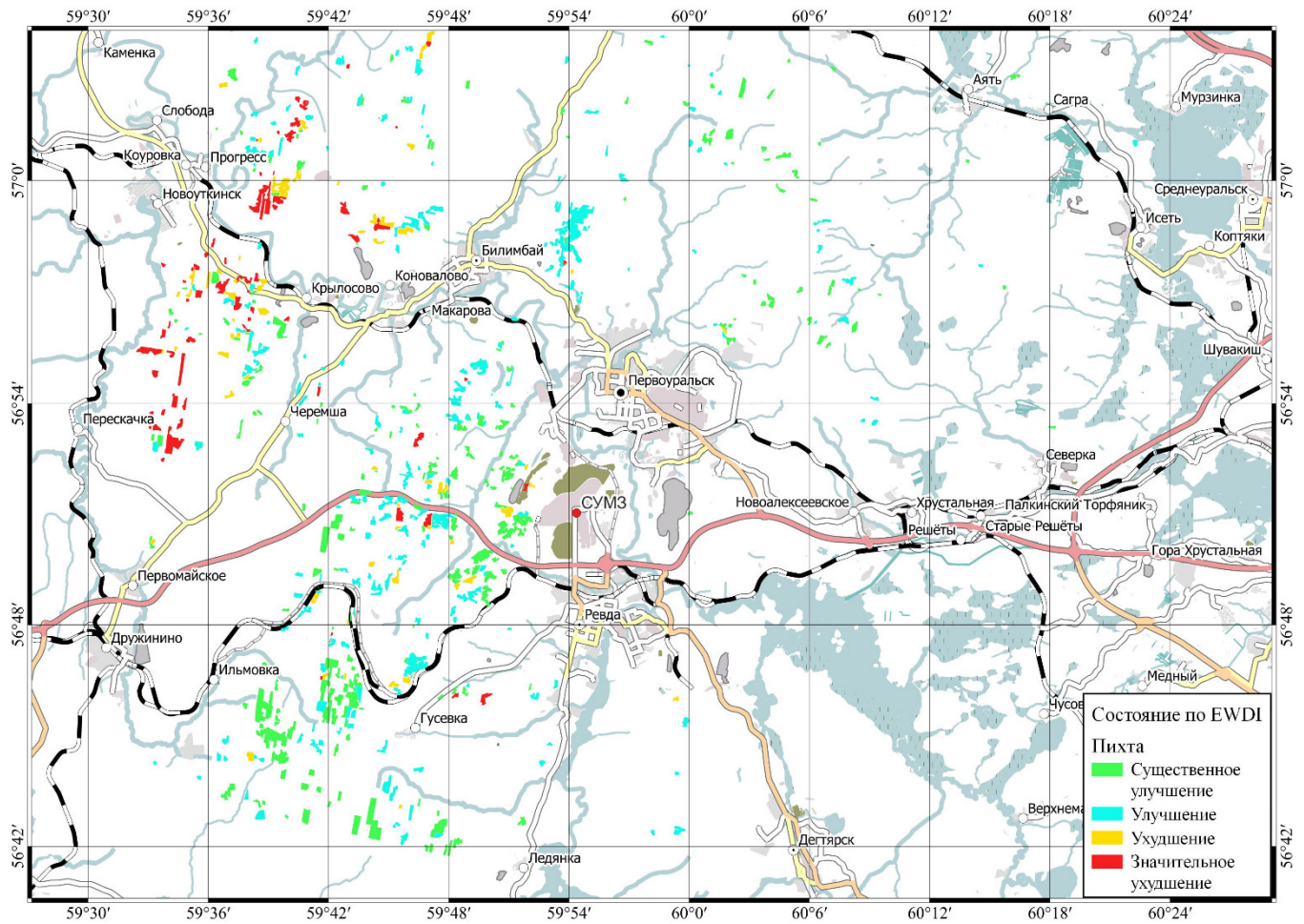
Картосхема состояния пихтовых насаждений в 1996 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



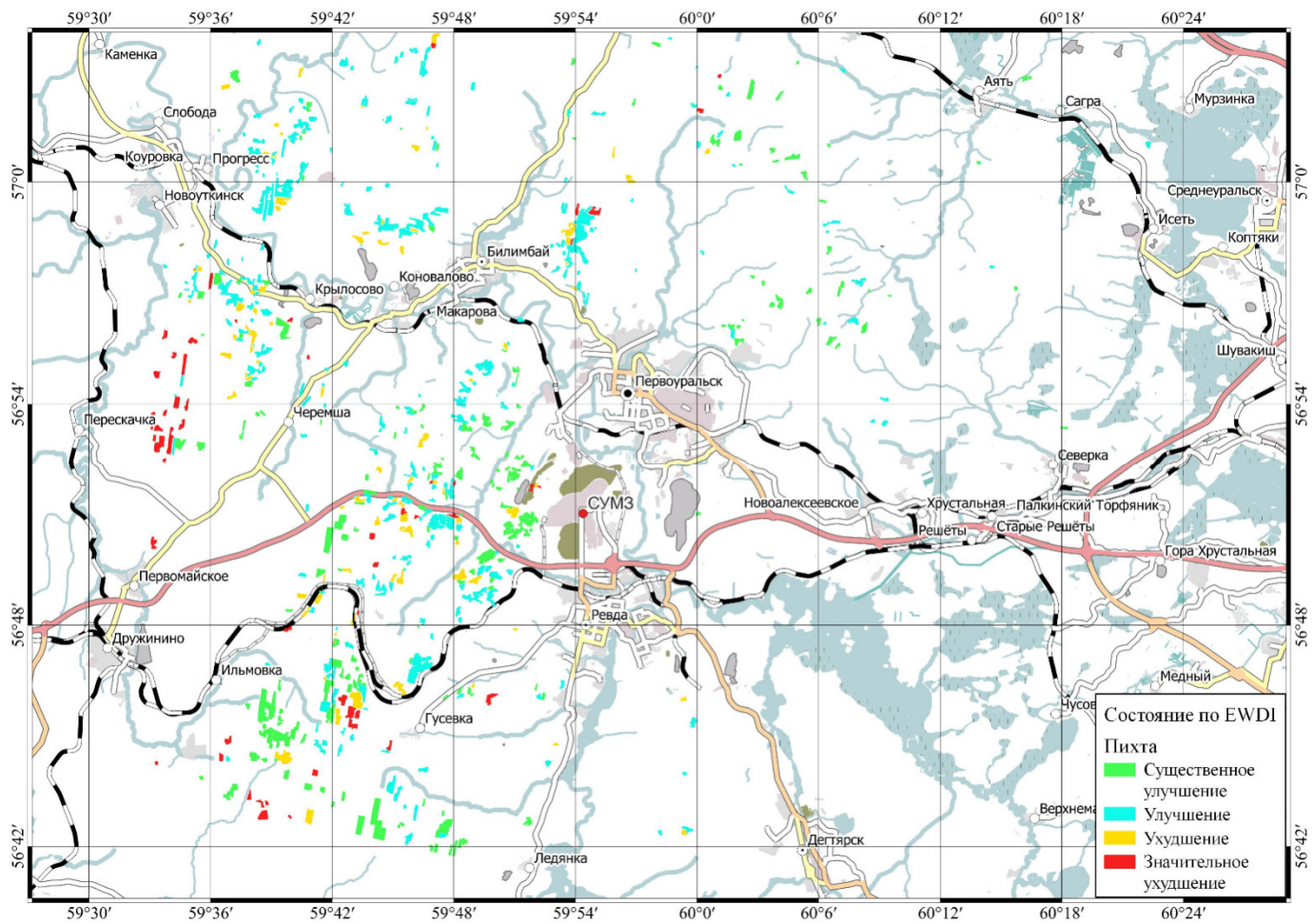
Картосхема состояния пихтовых насаждений в 2002 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI относительно состояния 1988 г.



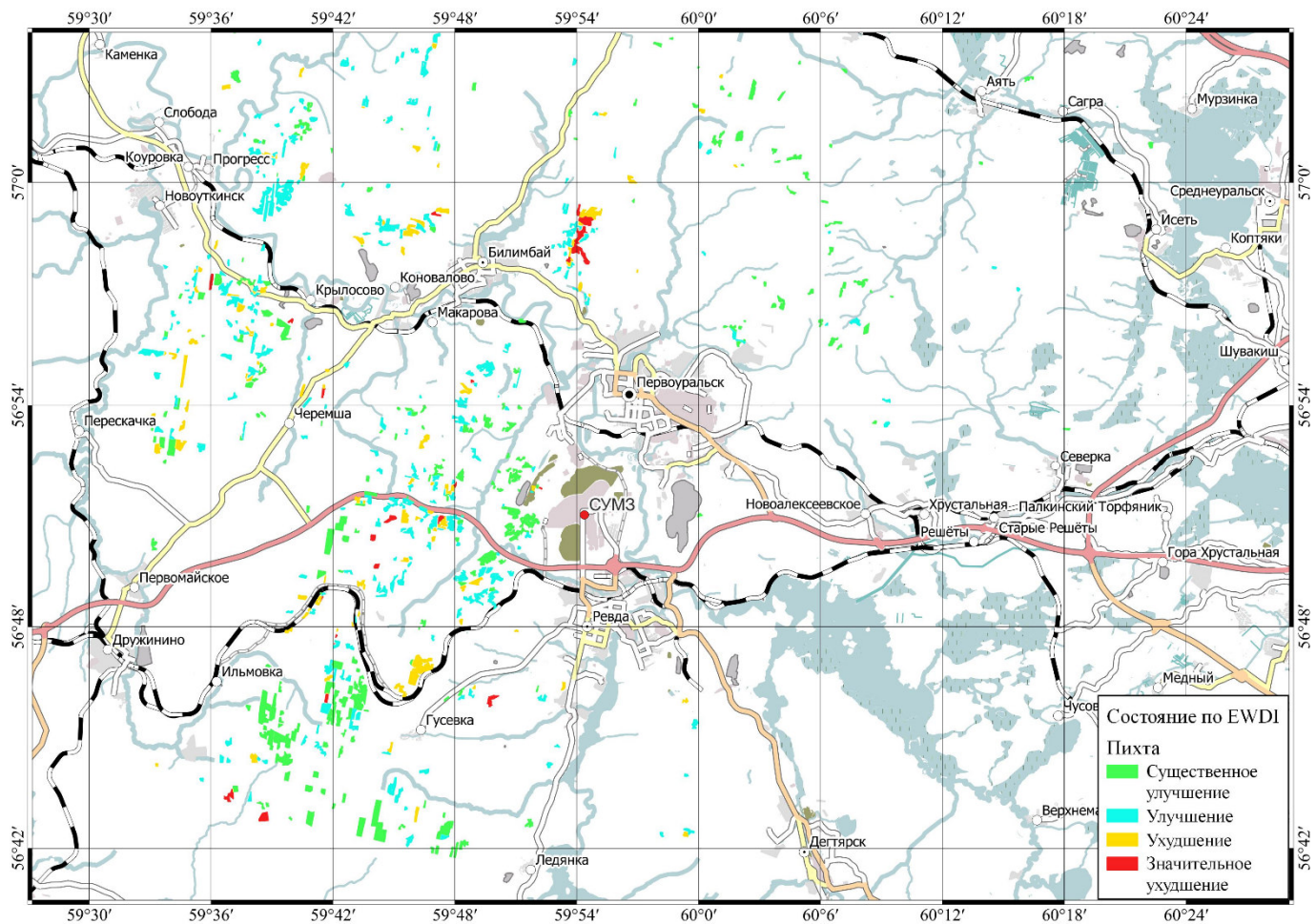
Картосхема состояния пихтовых насаждений в 2010 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI относительно состояния 1988 г.



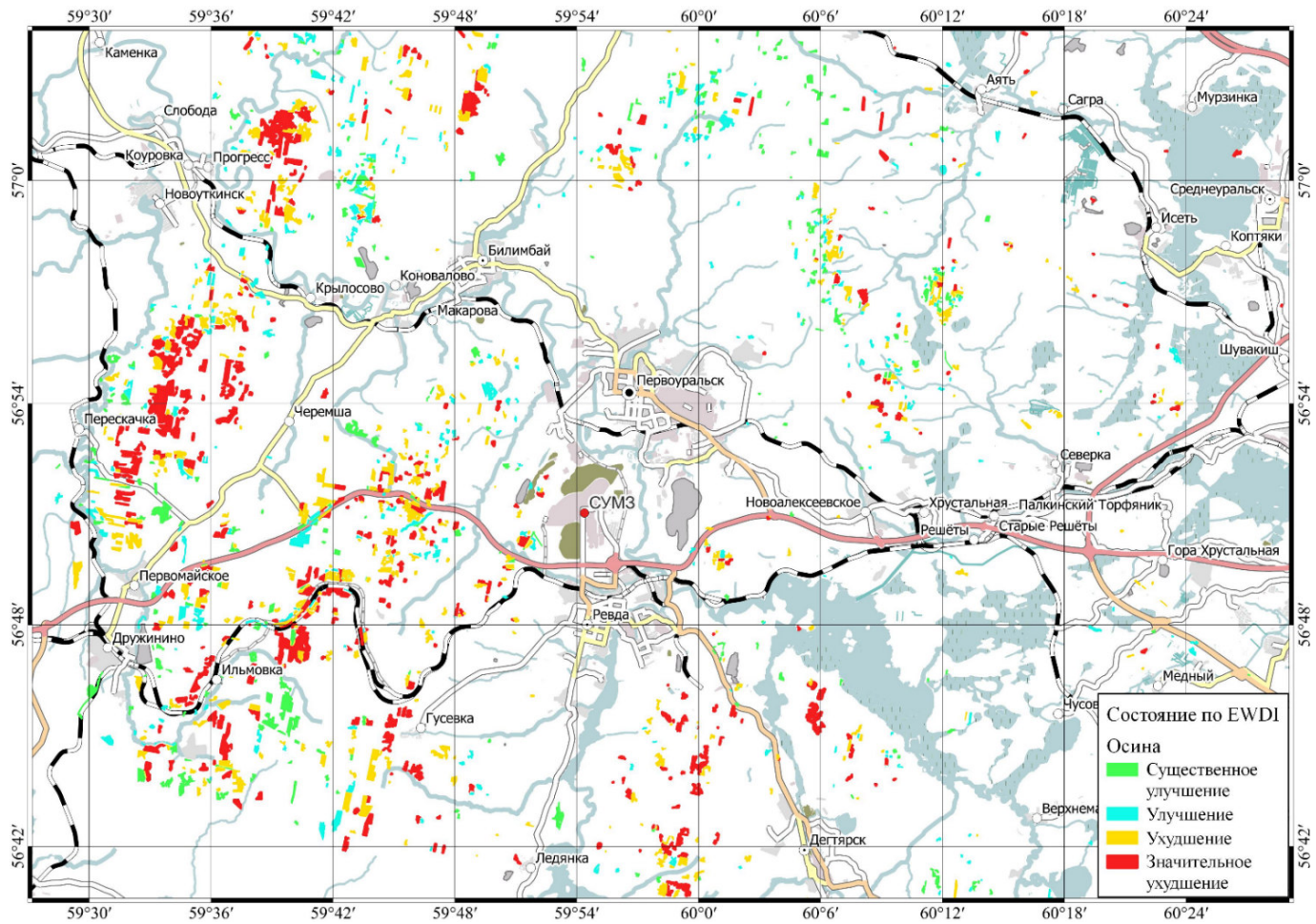
Картосхема состояния пихтовых насаждений в 2015 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



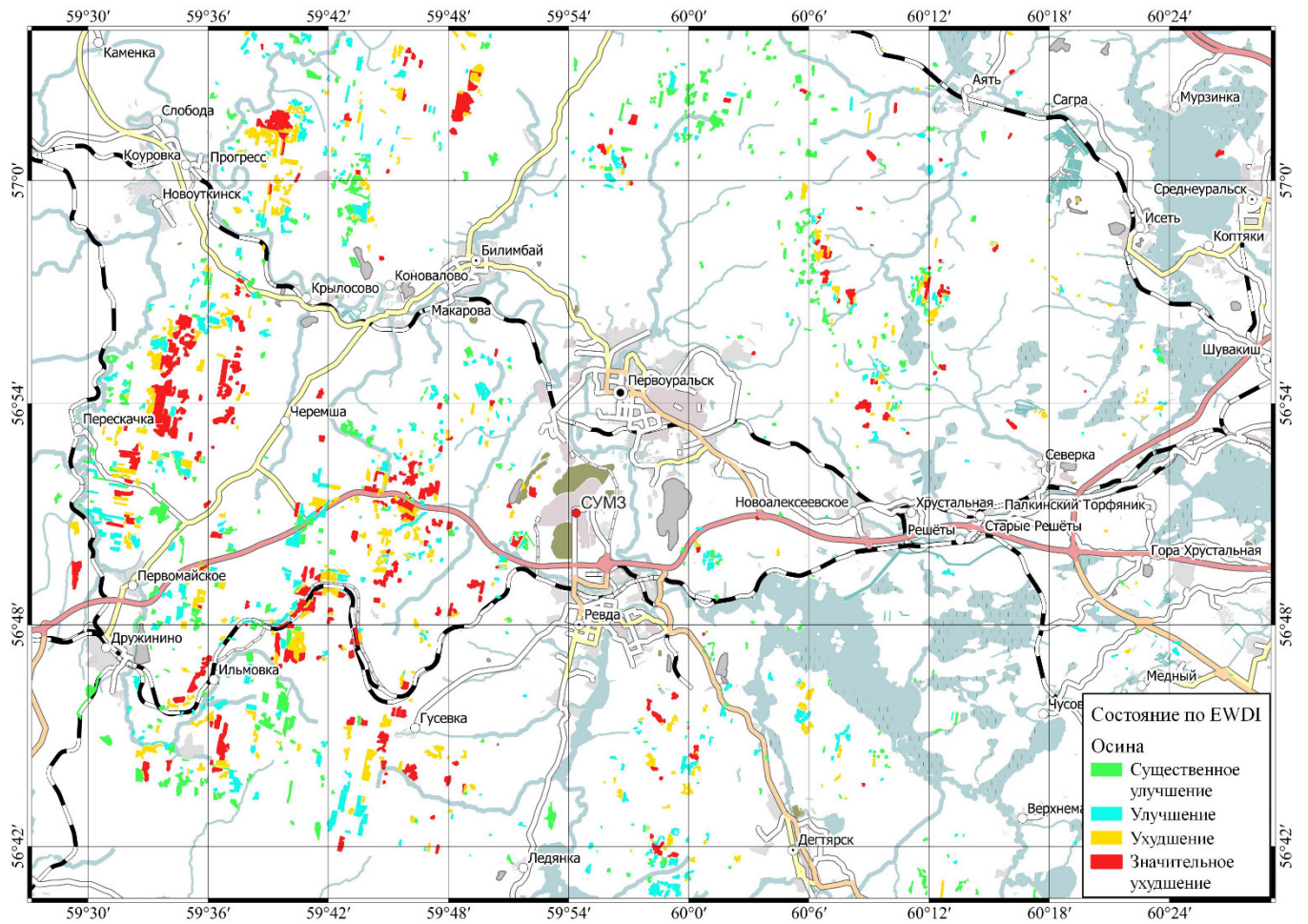
Картосхема состояния пихтовых насаждений в 2018 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



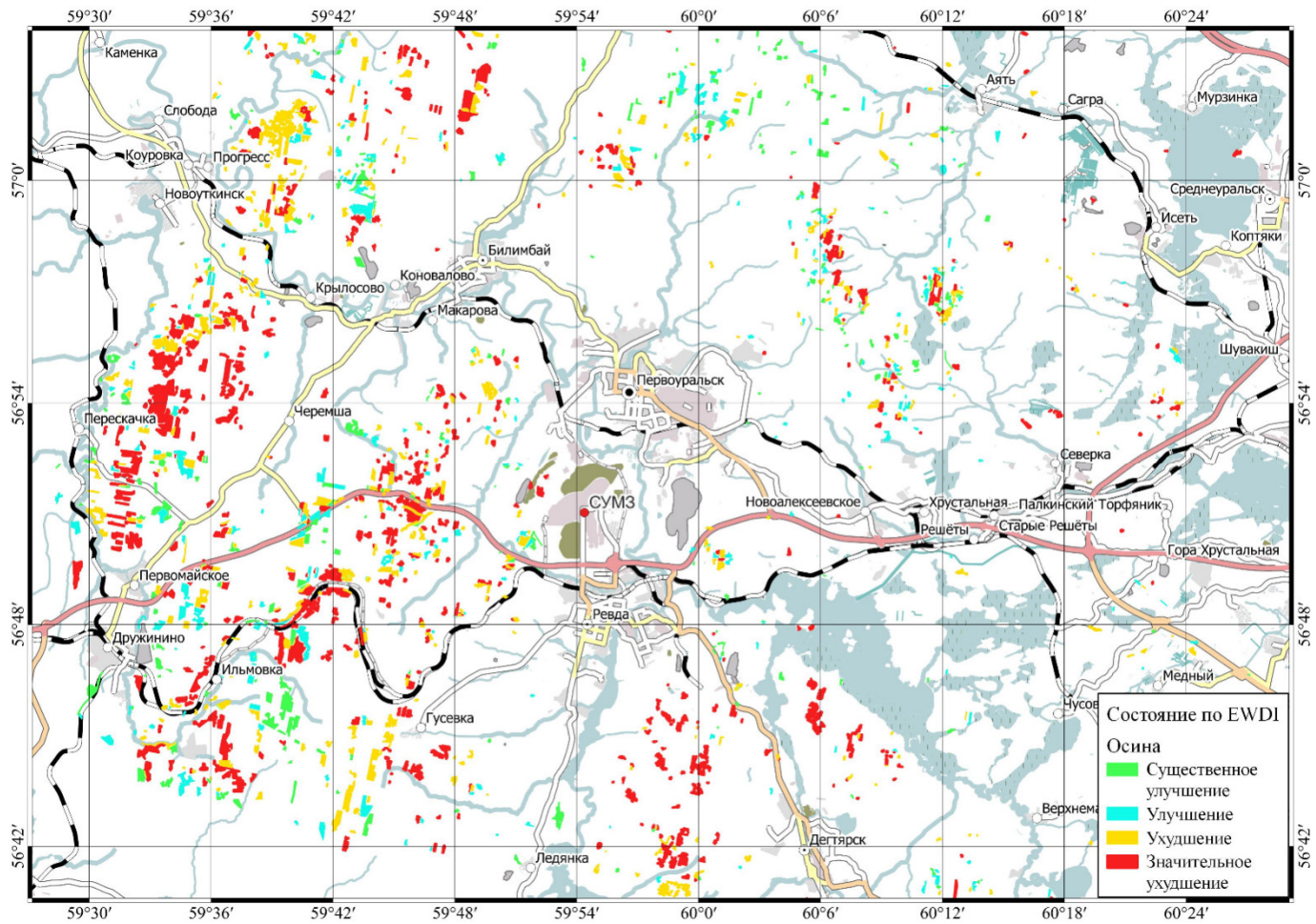
Картосхема состояния пихтовых насаждений в 2020 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



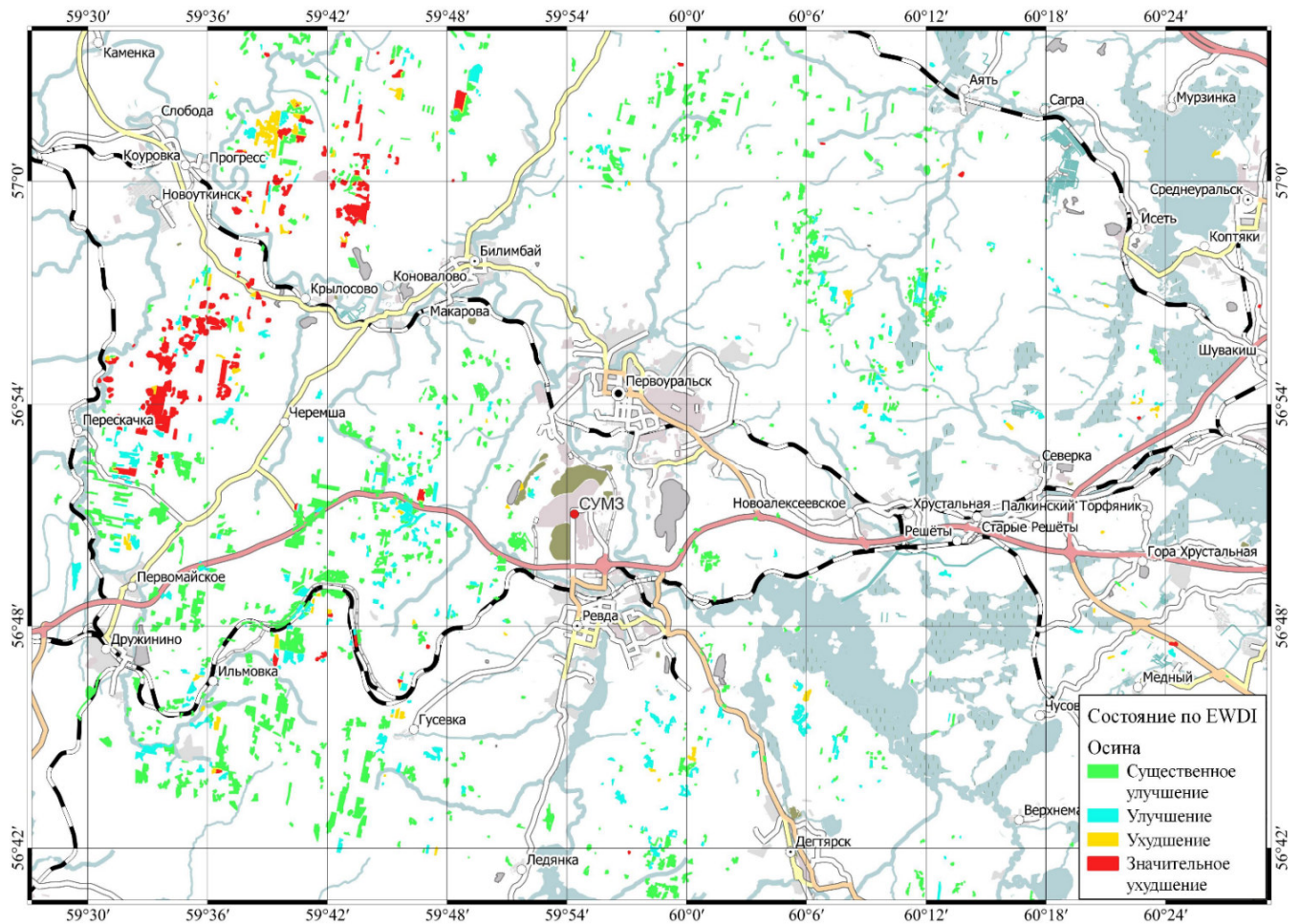
Картосхема состояния осиновых насаждений в 1996 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



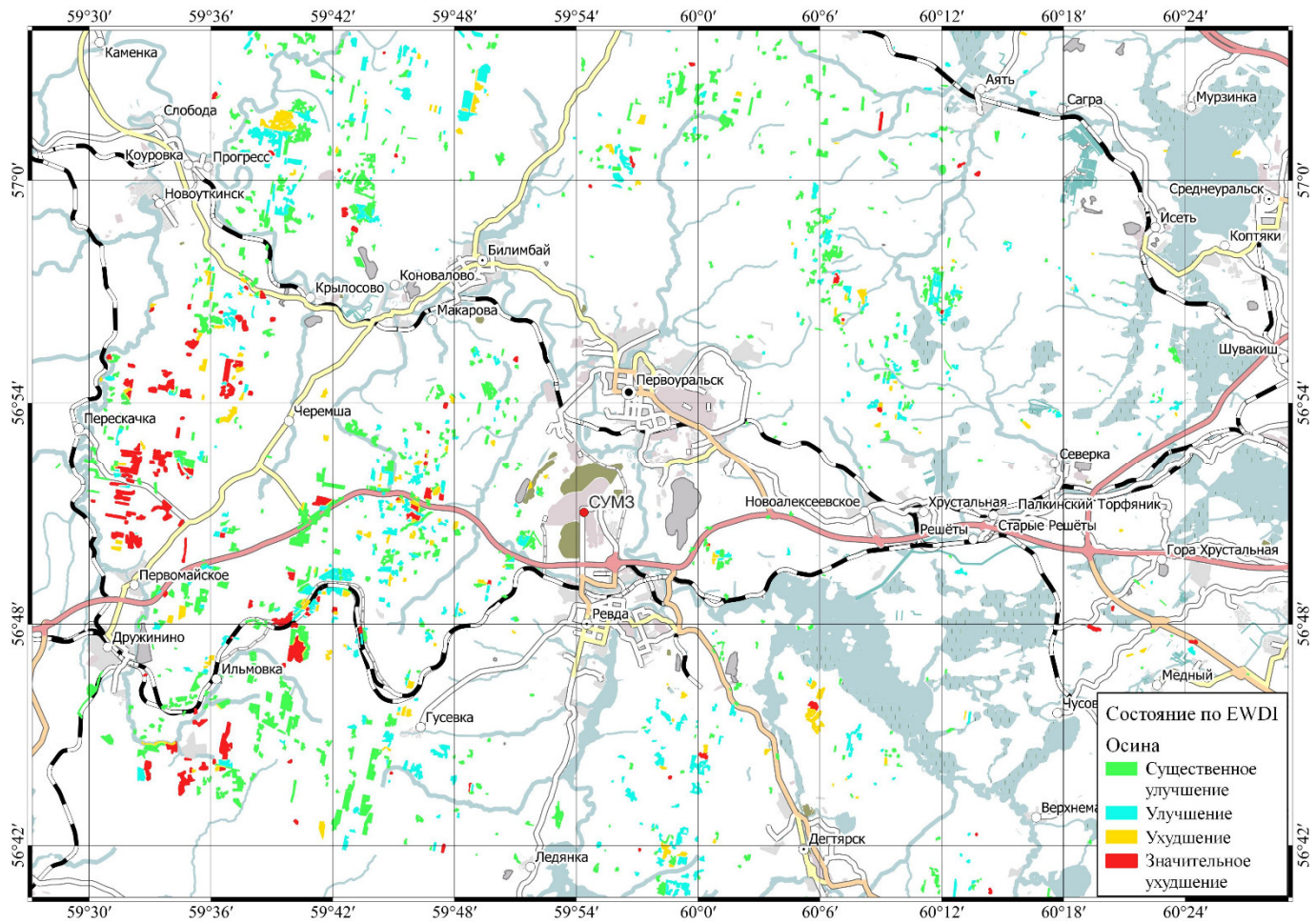
Картосхема состояния осиновых насаждений в 2002 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI относительно состояния 1988 г.



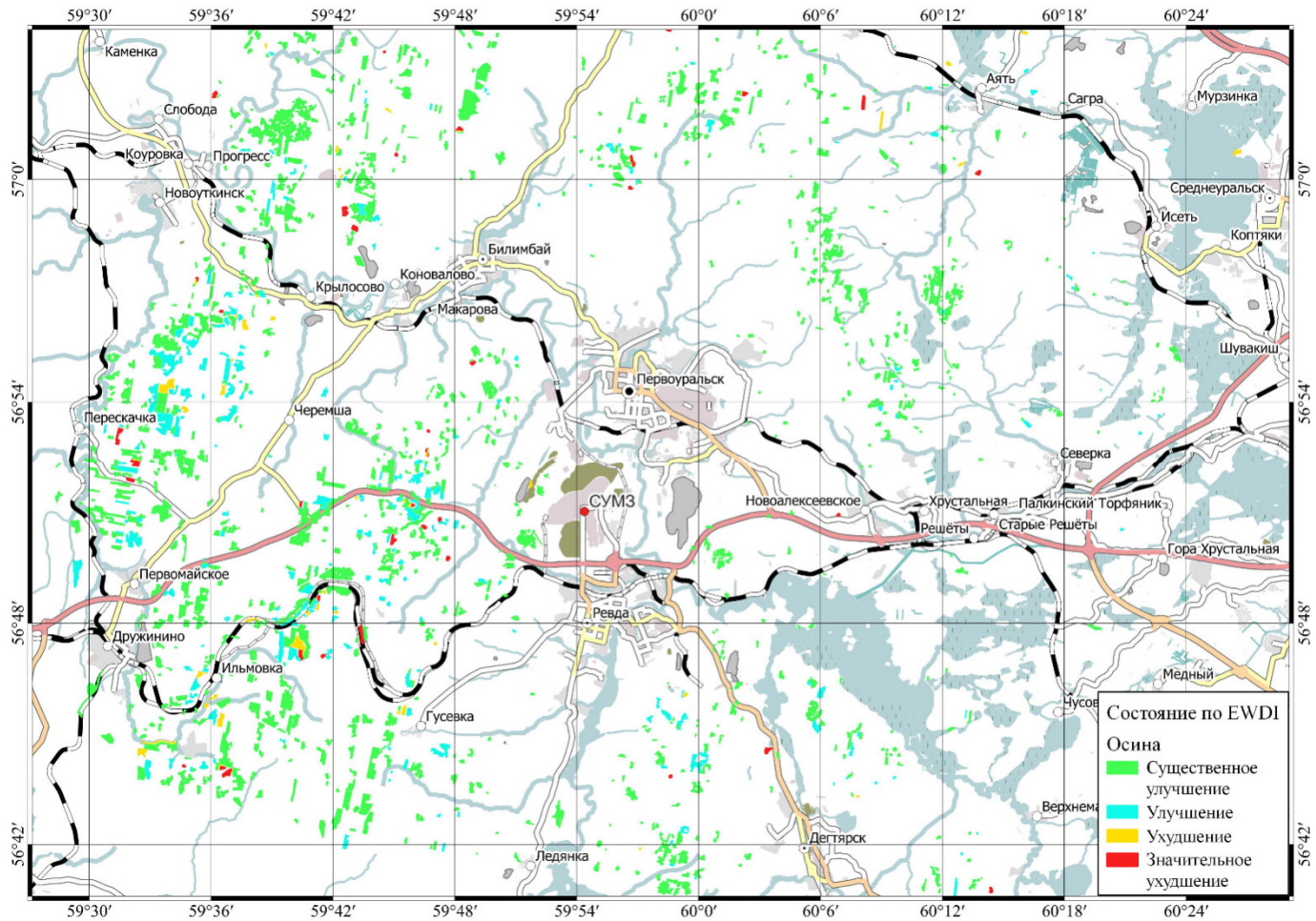
Картосхема состояния осиновых насаждений в 2010 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.



Картосхема состояния осиновых насаждений в 2015 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI относительно состояния 1988 г.



Картосхема состояния осиновых насаждений в 2018 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI относительно состояния 1988 г.



Картосхема состояния осиновых насаждений в 2020 г., составленная на основе значений улучшенного индекса влажности EWDI, относительно состояния 1988 г.

Распределение лесных насаждений района исследований по типам леса

Тип леса	Лесные насаждения по преобладающей породе, га				
	Сосна	Береза	Ель	Осина	Пихта
Сосняк ягодниковый (Сяг)	30698,3	8834,9	101,9	333,8	-
Ельник-сосняк травяной (ЕСтр)	10620,9	16484,5	10325,7	4534,4	996,4
Ельник-сосняк ягодниковый (ЕСяг)	8278,0	2479,7	1152,9	345,3	320,1
Сосняк разнотравный (Сртр)	6640,0	10253,1	66,6	1087,2	-
Сосняк орляковый (Сорл)	1835,3	522,2	24,9	9,9	-
Сосняк ягодниково-липняковый (Сялп)	1789,4	2740,7	34,4	298,3	-
Сосняк кустарничково-сфагновый (Скссф)	1716,1	-	-	-	-
Сосняк-ельник осоково-сфагновый (СЕосф)	993,7	341,7	475,3	-	-
Сосняк осоково-сфагновый (Сосф)	1492,0	244,0	-	-	-
Ельник-сосняк ягодниково-липняковый (ЕСялп)	697,6	389,4	163,8	95,1	143,3
Сосняк травяно-липняковый (Стрлп)	780,3	1899,7	24,5	510,1	-
Сосняк брусничниковый (Сбр)	578,8	149,9	-	0,8	-
Ельник-сосняк зеленомошниково-ягодниковый (ЕСзяг)	439,6	128,0	543,6	30,5	175,2
Сосняк-ельник ягодниковый (СЕяг)	432,4	206,7	-	20,8	-
Сосняк сфагново-хвощовый (Ссфхв)	370,6	73,8	-	-	-
Сосняк кустарничково-сфагновый (Скссф)	202,9	17,4	-	-	-
Сосняк-ельник высокотравный (СЕвтр)	130,6	3123,7	490,1	84,1	21,9
Ельник-сосняк травяно-липняковый (ЕСтрлп)	93,3	2255,7	1037,1	1109,3	629,4
Березняк осоково-сфагновый (Боссф)	-	3001,1	-	-	-
Сероольшаник высокотравный (Олвт)	-	61,4	-	-	-
Ельник крупнопоротниковый (Екрп)	-	494,5	233,6	403,7	-
Ельник-кедровник хвощово-мшистый (ЕКхвм)	-	22,5	265,2	-	-
Ельник липняковый (Елп)	-	926,0	1130,6	593,2	590,5
Ельник мшистый (Емш)	-	590,1	896,0	-	-
Ельник нагорный (Енг)	-	15,2	20,7	-	-
Ельник приручьевой (Епрч)	-	494,3	282,0	12,8	-
Ельник разнотравно-зеленомошниковый (Ерзм)	-	1438,1	2667,2	38,9	729,6
Ельник травяно-зеленомошниковый (Етзм)	-	190,9	601,2	10,5	53,4
Ельник травяно-липняковый (Етрлп)	-	533,0	986,0	283,3	368,5
Ельник травяной (Етр)	-	133,8	403,2	66,9	49,6
Ельник хвощовый (Ехв)	-	159,7	283,1	-	-
Сосняк-ельник разнотравный (СЕртр)	-	74,9	87,4	16,9	-
Итого	67790,0	58281,0	22297,0	9886,0	4078,0

Приложение № 35

Динамика изменения площадей еловых насаждений по категориям состояния, определенных по значению индекса 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	4892,0	21,9	9658,0	43,3	4766,0	97,4	21,4
Улучшение	3177,0	14,3	8011,0	35,9	4834,0	152,2	21,7
Ухудшение	9567,0	42,9	3679,0	16,5	-5888,0	-61,5	-26,4
Значительное ухудшение	4661,0	20,9	949,0	4,3	-3712,0	-79,6	-16,6
Итого	22297,0	100,0	22297,0	100,0			

Динамика изменения площадей пихтовых насаждений по категориям состояния, определенных по значению индекса 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	663,0	16,3	1778,0	43,6	1115,0	168,2	27,3
Улучшение	491,0	12,0	1495,0	36,7	1004,0	204,5	24,6
Ухудшение	2618,0	64,2	604,0	14,8	-2014,0	-76,9	-49,4
Значительное ухудшение	305,0	7,5	201,0	4,9	-104,0	-34,1	-2,6
Итого	4078,0	100,0	4078,0	100,0			

Динамика изменения площадей осиновых насаждений по категориям состояния, определенных по значению индекса 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	1912,0	19,3	7830,0	79,2	5918,0	309,5	59,9
Улучшение	1626,0	16,5	1587,0	16,1	-39,0	-2,4	-0,4
Ухудшение	3059,0	30,9	277,0	2,8	-2782,0	-90,9	-28,1
Значительное ухудшение	3289,0	33,3	192,0	1,9	-3097,0	-94,2	-31,3
Итого	9886,0	100,0	9886,0	100,0			