

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

Байбар Анастасия Сергеевна

**ЛАНДШАФТНЫЕ ИНВАРИАНТЫ НА ОСНОВЕ
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ, ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА И ПОЛЕВЫХ
ДАННЫХ**

Специальность 1.6.12 – Физическая география и биогеография, география
почв и геохимия ландшафтов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
к.г.н., старший научный сотрудник
Пузаченко Михаил Юрьевич

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Инвариант ландшафта.....	13
1.1 Понятие инварианта, инварианта ландшафта.....	13
1.2 Инвариант с позиций теории динамических систем. Условия существования инвариантности.....	16
1.3 Методы выделения инвариантов, параметров порядка, главных компонент.....	21
1.4 Использование метода главных компонент для выделения параметров порядка рельефа.....	23
1.5 Использование метода главных компонент для выделения инвариантов мультиспектральных данных дистанционного зондирования.....	27
2. Физико-географическая характеристика территории.....	37
2.1 Геолого-геоморфологическая характеристика территории.....	38
2.2 Поверхностные и грунтовые воды.....	46
2.3 Климат.....	47
2.4 Растительный покров.....	59
2.5 Почвенный покров.....	67
2.6 Ландшафтная структура.....	69
3. Материалы и методы.....	76
3.1 Мультиспектральные данные съемочной системы Landsat TM, ETM+, OLI, OLI2.....	76
3.2 Полевые материалы (геоботанические и почвенные описания).....	83
3.3 Морфометрические параметры рельефа на разных иерархических уровнях.....	88
3.4 Общая схема анализа данных.....	95
4. Результаты.....	99
4.1 Инварианты мультиспектральных дистанционных данных.....	104
4.2 Инварианты длинноволновых данных Landsat.....	122
4.3 Параметры порядка рельефа.....	128
4.4 Ландшафтные инварианты на основе МДДЗ и ЦМР и их верификация по полевым данным.....	132
4.5 Карта инвариантных биогеофизических состояний южно-таежного ландшафта.....	137
Заключение.....	161
Выводы.....	168
Список литературы.....	170
Приложения.....	189

Введение

Термин инвариант геосистемы (ландшафта) был введен В.Б. Сочавой еще в конце XX века, однако в дальнейшие годы данное понятие воспринималось абстрактно, не было единой трактовки и методов его выделения, что привело к статической интерпретации данного понятия Ф.Н. Мильковым и его учениками. Новые возможности в изучении инвариантов ландшафта дает появление новых средств измерения свойств ландшафта, таких как мультиспектральные данные дистанционного зондирования (МДДЗ), что позволило применить к анализу его функционирования методический подход, основой которого является представление о ландшафте, как о сложной динамической системе. Согласно теории динамических систем, состояние системы – есть положение ее элементов в пространстве признаков в момент времени, а собственно «динамическая система» – процесс смены этих состояний. Объем данных мультиспектральной съемки позволяет оперировать уже целыми сериями измерений отраженной солнечной радиации в различных спектральных диапазонах. Результат одного такого измерения – набор функциональных переменных, отражающих процессы преобразования солнечной энергии растительным покровом. Располагая набором состояний, мы получаем возможность «отследить» траекторию как отдельных элементов системы, так и всей системы в целом. Траектории в соседних точках могут иметь различную степень подобия. Группы соседних точек с подобными траекториями образуют аттрактор, определяемый единым механизмом регулирования флуктуаций среды, и могут быть ассоциированы с целостными пространственными системами. Группы соседних точек с различными траекториями образуют континуум, в общем случае отражающий изменяющиеся в пространстве и/или времени механизмы функционирования. Соотношения в пространстве между этими крайним формами реализации динамической системы определяют уровень организации ландшафта. Естественно, что эту динамическую систему можно исследовать для различных временных интервалов (сутки, сезоны, многолетние циклы).

Накопление МДДЗ даёт возможность реализовать разработку теоретико-методологических оснований анализа реальных рядов измерений функциональных переменных ландшафта, отображающих в первую очередь работу растительного покрова по преобразованию солнечной энергии. Этот подход должен создать основу максимально полного использования мультиспектральных дистанционных измерений со спутников и БПЛА в различных временных диапазонах.

В качестве теоретико-методологического основания для исследования пространственно-временной динамики геосистем может рассматриваться синергетика. Введенное одним из ее основоположников Г. Хакеном (1980) представление о параметрах порядка системы – небольшом числе независимых переменных, определяющих все наблюдаемое разнообразие состояний функциональных переменных системы, практически тождественно представлению об инварианте геосистемы В.Б. Сочавы (1978) как некоторой пространственной структуры неизменной на определенном временном интервале.

Цель исследования – выделение пространственно-временных инвариантов южно-таежных ландшафтов на основе анализа временных рядов мультиспектральных данных Landsat, цифровой модели рельефа и полевых данных, на примере Центрально-Лесного заповедника и прилегающей территории.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

Задачи исследования:

1. Выделение пространственно-временных инвариантов отражения, получаемых на основе мультиспектральных данных Landsat 4 – 9 поколений с 1987 по 2022 годы;
2. Расчет параметров порядка рельефа на основе морфометрических характеристик на разных иерархических уровнях;

3. Интеграция инвариантов отражения и параметров порядка рельефа с целью получения ландшафтных инвариантов;
3. Семантическая интерпретация полученных ландшафтных инвариантов по полевым данным (по геоботаническим и почвенно-геоморфологическим описаниям, выполненным на территории Центрально-Лесного заповедника и его окрестностей);
4. Классификация ландшафтных инвариантов с целью получения карты инвариантных состояний южно-таежного ландшафта юга-запада Валдайской возвышенности с семантической интерпретацией полученных классов на основе полевых описаний и исходных данных.

Объект исследования – южно-таежный ландшафт юго-запада Валдайской возвышенности (территория Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника и его окрестностей)

Предмет исследования - пространственно-временные инварианты состояний динамической ландшафтной системы

Основные защищаемые положения

1. Использование метода главных компонент относительно исходных каналов Landsat позволяет выделить несколько компонентов снимков, отражающих основные характеристики растительного покрова: общую яркость, характеризующую общую биомассу, яркость в ближнем ИК канале, характеризующую интенсивность фотосинтеза, яркость в коротковолновых ИК каналах, характеризующую содержание свободной воды.
2. Последовательное обобщение мультиспектральной дистанционной информации позволяет выделить пространственно-временные инварианты отражения состояний южно-таежного ландшафта юга-запада Валдайской возвышенности за последние 35 лет.
3. Для территории исследования можно выделить 12 независимых параметров порядка рельефа.

4. Ландшафтные инварианты одновременно (эмерджентно) описывают основные закономерности организации растительного покрова и рельефа территории исследования и имеют значимые связи с характеристиками полевых описаний.

В соответствии с этим работа включает следующие главы:

Глава 1. Понятие инварианта ландшафта с позиции теории динамических систем, условия существования инвариантности, методы выделения. В главе кратко излагается история развития теории инвариантов в географии, даются основные определения. Инвариант рассматривается с позиции теории сложных нелинейных систем и тождественен параметру порядка в синергетике, раскрываются условия существования инвариантности: принцип многосвязности и двусторонней компенсации. Приводится обзор отечественной и зарубежной литературы.

Глава 2 Физико-географическая характеристика территории. В главе кратко дана физико-географическая характеристика территории исследования, прямоугольника с координатами углов: 32.607781 в.д., 56.682393 с.ш., 33.230169 в.д., 56.682798 с.ш., 32.611149 в.д., 56.354927 с.ш., 33.228192 в.д., 56.355327 с.ш. и общей площадью 139 200 га. Исследование выполнено для южно-таежного ландшафта юго-запада Валдайской возвышенности, ядро и охранный зона ЦЛГПБЗ и прилегающая территория (Тверская область, Россия). Отличительная особенность территории исследования – на значительной площади произрастают ельники, не испытавшие антропогенного воздействия, следовательно, для них характерны естественные факторы динамики: ветровалы, деятельность насекомых, сукцессионные смены. В то же время, на прилегающей к заповеднику территории расположены сенокосы, селитебные земли, вырубки, для которых ведущий фактор динамики - деятельность человек. А также постагрогенные земли, в настоящее время представленные залежами различной степени зарастания и молодыми мелколиственными лесами.

Глава 3 Материалы и методы. Рассматриваются данные, используемые в работе, дается характеристики снимков съемочной системы Landsat 4-9 поколений, выполненных с 1987 по 2022 год на территорию исследования; полевых данных (геоботанических и почвенных описаний); рельефа (демонстрируется расчет иерархических уровней и морфометрических параметров рельефа). Описываются методы уменьшения признакового пространства исходных данных, выделение параметров порядка/инвариантов методом главных компонент.

Глава 4 Результаты. Излагаются результаты анализа мультиспектральной информации, демонстрируются частные пространственно-временные инварианты, отражающие в первую очередь количество биомассы, интенсивность протекания фотосинтеза и количество воды в геосистеме, интегральные инварианты отражения и их физический смысл. Рассматривается карта инвариантных состояний ландшафтов, полученная на основе интеграции инвариантов отражения и параметров порядка рельефа и полевых данных.

Выводы.

Научная новизна

- Впервые мультиспектральная дистанционная информация более чем за 35 лет использована для выделения инвариантных состояний геосистем. Только к 2022 году накопилось минимальное необходимое число безоблачных снимков для количественного выделения устойчивых пространственно-временных состояний по данным сцен Landsat;
- Впервые предложена методика обработки временной серии мультиспектральной информации, представляющей собой последовательное обобщение основных каналов сцен Landsat;
- Впервые проведено выделение параметров порядка морфометрических характеристик рельефа на основе анализа его иерархической структуры;

- Впервые проведена интеграция инвариантов отражения и параметров порядка рельефа с выделением ландшафтных инвариантов;
- Впервые на основе общих инвариантов отражения и параметров порядка рельефа рассчитана карта инвариантных биогеофизических состояний на территорию Центрально-Лесного заповедника с семантической интерпретацией классов состояний на основе полевых данных.

Научно-практическая значимость работы.

Ландшафтное картографирование почти не изменилось за последние 40-50 лет, специалисты используют хорошо отработанные методы, предложенные еще Исаченко А.Г., Николаевым В.А., Солнцевым Н.А., Видиной А.А. и др. Как правило, до сих пор ландшафтные карты отрисовываются на основе экспертного подхода, то есть качество картографирования зависит от квалификации эксперта, а результаты данной работы не всегда сопоставимы. Так же процесс создания традиционной ландшафтной карты трудо- и времязатратный, а сами карты можно воспринимать как произведение искусства, «картину».

У такого подхода есть ряд существенных минусов, во-первых, возникают вопросы об объективности проведения ландшафтных границ по ограниченному количеству данных, например по единичному снимку (Черных, 2019). Во-вторых, современные прикладные задачи требуют от ландшафтных картографов оперативности, быстрого построения ландшафтной карты и серии тематических на ее основе, что невозможно при существующем подходе.

В данном исследовании предлагается подход, который даёт возможность построения не ситуативной ландшафтной карты, а охватывающей значительный период времени. Выделение инвариантов на основе временных серий МДДЗ и ЦМР и сопоставление их с полевыми данными рассматривается как основа для построения карты инвариантных состояний ландшафтов, полученной количественными методами, следовательно, позволяет минимизировать субъективность при ее создании.

Также данный подход позволяет создавать серии актуальных карт с охватом меньшего периода времени для оценки пространственной динамики ландшафтного покрова.

Разрабатываемый метод выделения инвариантов может быть применен как в сельском, так и лесном хозяйстве. Если рассматривая геосистема инвариантна ко многим внешним возмущениям с различной мощностью, то по отношению к ней могут быть применены различные стратегии хозяйственного использования без дополнительных мер защиты таких, как посадка лесополос, внесение удобрений, строительство мелиоративных каналов и т.д. А в случаях, когда специализированные меры, уменьшающие негативное воздействие, необходимы, их выбор должен быть обоснован с учетом конструктивных особенностей системы, определяющих естественную инвариантность.

Инварианты могут быть использованы в вопросах, касающихся оценки состояния окружающей среды, экологического мониторинга и экосистемных услуг. Так, устойчивые отношения переменных за определённый временной интервал могут рассматриваться как «отправная точка» или эталон. Например, со спутников Landsat можно получить информацию о содержании определенных химических элементов в нижних слоях атмосферы, а выделение пространственно-временных инвариантов позволит рассматривать только резкие отклонения от стационарных состояний.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в ежегодном сборе полевого материала на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника с 2015 по 2023 год, в анализе отечественной и зарубежной научной литературы, в обработке данных дистанционного зондирования и верификации результатов. Основная заслуга автора – это систематизация полевых материалов, исправление ошибок в базе данных геоботанических и почвенных описаний, связанных с опечатками при переносе данных полевых дневников в базу данных Access (выявляется на основе дескриптивной статистики и по полевым дневникам), с отсутствием нулевых значений,

(выявляется статистически и по космическим снимкам). Также была ликвидирована проблема разных названий травянистых видов и почвенных горизонтов.

Апробация работы.

Материалы научно-квалификационной работы доложены на ряде всероссийских и международных конференций:

- VIII национальная научная конференция с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (ЭкоМатМод-2023) (Пушино, Россия, 2023)
- Международная научная конференция «Картографирование биоты: традиции и актуальные вопросы развития», посвященная 85-летию со дня рождения д.г.н. А.В. Белова и д.б.н. В.Ф. Лямкина (Иркутск, Россия, 2023)
- VI Международная конференция «Мониторинг и оценка состояния растительного мира» (Минск-Лясковичи, Беларусь, 2023)
- Международный конгресс IALE «Transboundary Resource Management, Climate Change and Environmental Resilience» (Найроби, Кения, 2023)
- Международная ландшафтная конференция «Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии», VII Мильковские чтения, посвященные 105-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФ, д.г.н., проф. Ф.Н. Милькова (Воронеж, 2023)
- Всероссийская с международным участием конференции ««Научные исследования и экологический мониторинг на особо охраняемых природных территориях России и сопредельных стран» (Центрально-Лесной государственный, природный биосферный заповедник, 2022),
- Международная конференция «ИнтерКарто. ИнтерГИС 26. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий» (Тбилиси, Грузия, 2020),
- Международная конференция «Landscape Science and Landscape Ecology: Considering Responses to Global Challenges» (Москва, 2020),

- Международный конгресс IALE «Nature and society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology» (Милан, Италия, 2019),
- Международная ландшафтная конференция «Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов» (Воронеж, 2018),
- Международная конференции «Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии» (Минск, 2018),
- Международная научной конференции «Ломоносов- 2018» (Москва, 2018).

Работа над диссертационной работой осуществлялась в ходе выполнения грантов РНФ и РФФИ:

- 17-05-41069 «Комплексный анализ мультиспектральной и гиперспектральной дистанционной информации для оценки состояния свойств природно-антропогенных геосистем и их картографирования», (2017 – 2019 гг.);
- 19-05-00539 «Ландшафтные инварианты как параметры динамической системы» (2019 – 2021 гг.);
- 18-17-00129 «Соотношение континуальности и дискретности в пространственной организации ландшафтного покрова» (2018 – 2020 гг.);
- 22-27-00781 «Термодинамические параметры ландшафтного покрова на основе неэкстенсивной статистической механики по данным дистанционного зондирования» 2022 - 2023 гг.

Также в ходе выполнения гранта 075-15-2024-554 в виде субсидии крупного научного проекта Минобрнауки России. Проект «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации» (2024 – 2026 гг.)

Результаты диссертационного исследования дважды доложены на семинарах отдела физической географии и проблем природопользования Института географии РАН, Международной лаборатории ландшафтной

экологии НИУ ВШЭ, прочитана лекция для молодых исследователей ландшафтно-экологической школы «Актуальные методы анализа ландшафтной структуры на основе данных дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа и полевых данных», прошедшей на территории Центрально-Лесного заповедника со 2 по 7 сентября 2024 года.

Публикации. Основные результаты работы представлены в 16 статьях, 4 из которых входит в перечень ВАК.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.г.н., с.н.с. отдела физической географии и проблем природопользования Института географии РАН М.Ю. Пузаченко за всестороннюю помощь. Автор выражает благодарность Ю.Г. Пузаченко, под руководством которого принимала участие в исследованиях на территории Центрально-Лесного заповедника. Именно ему удалось пробудить интерес к изучению термодинамики, физико-математических методов в экологии и ландшафтоведении. Автор выражает искреннюю благодарность сотруднику Института географии РАН, к.г.н. А.Н. Кренке; руководителю Международной лаборатории ландшафтной экологии НИУ ВШЭ, к.б.н. Р.Б. Сандлерскому; сотруднику Института проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова И.И. Широне – за предоставление материалов и за помощь в обработке данных; сотрудникам и студентам кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, сотрудникам Института проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова, Института географии РАН – за сбор комплексных описаний растительности и почвы, использованных в работе, а также руководству Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, в лице директора А.Н. Потемкина и заместителя по науке Е.А. Шуйской и ведущего научного сотрудника А.С. Желтухина и за помощь в организации полевых работ.

Глава 1 Инвариант ландшафта¹

1.1 Понятие инварианта, инварианта ландшафта

Термин инвариант (от латинского “*invariant*” – неизменяющийся) впервые был введен английским математиком Джеймсом Джозефом Сильвестром в 1851 году. Совместно с А. Кэли им была разработана алгебраическая теория инвариантов, изучающая неизменяющиеся или частично изменяющиеся при замене линейных переменных многочлены или рациональные функции (Бородин, 1979). Во второй половине XIX века теория инвариантов оформилась как самостоятельная математическая дисциплина, которую в последующие годы развивал Давид Гильберт.

Термин инвариант первую половину XX века использовался только для объяснения неизменных величин в алгебре и геометрии. Но в последующие годы ввиду его универсальности он был постепенно внедрен в различные науки: физику, программирование, экономику, лингвистику, фольклористику, философию, географию и т.д. Так, в физике понятие инвариант обозначает физическую величину, которая остается неизменной в некотором физическом процессе на протяжении n -го количества времени (Визгин, 1972).

В географию термин инвариант был введен существенно позже, в период внедрения теории сложных систем, идей кибернетики, моделирования и математических методов в естественные науки. Впервые его использовал В.Б. Сочава, по мнению которого инвариант ландшафта – это совокупность свойств геосистемы, которые остаются неизменными при ее преобразовании (Сочава, 1978, с. 293). В последующее десятилетие термин получил распространение в ландшафтоведении, появились новые трактовки инварианта, которые мало отличаются от определений в философии, физике и других науках (Милюков, 1986). На отсутствие ясности в содержании понятия «инвариант» указывали В. С. Преображенский и Т. Д. Александрова. По их мнению, термины «инвариант» и «инвариантность», заимствованные из

¹ Подглавы 1.1, 1.2, 1.5 частично опубликованы в статье Ландшафтные инварианты – параметры порядка динамической системы / А.С. Байбар, М. Ю. Пузаченко, Р. Б. Сандлерский, А. Н. Кренке // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2023. — Т. 87, № 3. — С. 370–390

системного подхода, являются фундаментальными понятиями в учениях динамики и эволюции ландшафта, но, к сожалению, отсутствуют критерии выделения инвариантной ландшафтной структуры, ее границ и методов, определяющих ее в полевых условиях (Преображенский, 1975, с. 400). В 80-х годах термин также подвергся критике Т.П. Куприяновой, которая акцентирует внимание на слабой проработанности теории и методологии инвариантов (Куприянова, 1983, с. 11).

Следующий этап развития теории инвариантов в географии, в частности в ландшафтоведении, связан с природоохранным направлением. В это время подчеркивалась важность определения и поддержания инвариантных свойств для восстановления первоначального состояния ландшафта (Преображенский, 1982). Инвариант рассматривался как отправная точка в вопросах, связанных с антропогенным преобразованием природы. На этом этапе, ввиду отсутствия конкретных определений в ландшафтном контексте происходит смешение терминов «инвариант» и «устойчивость», что приводит к попыткам их разграничить рядом ученых. Один из них был Ю.Г. Пузаченко, который в 1983 году писал, что инвариантная система под воздействием возмущения не изменяет своего состояния в то время, как у устойчивой системы происходят перестройка, но в конце концов все возвращается к состоянию близкому к исходному (Пузаченко, 1983). Эти утверждения были подвержены критике со стороны Милькова Ф.Н., по его мнению, разграничение терминов надуманное, так как не существует систем, которые полностью не реагируют на возмущения (Мильков, 1986). Также попытки провести границу между устойчивостью и инвариантом предпринимала Т.П. Куприянова, но ей удалось только усугубить ситуацию, введя дополнительный термин «стабильность» (Мильков, 1986). Этот вопрос не решен по сей день, в современных работах «инерционность», «инертность», «инвариантность», «стабильность» выступают как идентичные понятия при оценке устойчивости геосистем (Дмитриев, Огурцов, 2012).

Принципиально новый виток в понимании термина «инвариант ландшафта» наблюдается после переосмысления понятия Ф.Н. Мильковым. По его мнению, инвариант – наиболее общие и устойчивые черты структуры типа ландшафтного комплекса на уровне семейства (Бевз, 2002). Инвариант ландшафта – это не что иное, как его типовая структура на разных иерархических уровнях (Мильков, 1986). Мильков считал, что введенный в научную литературу «инвариант» заменил понятие «тип», а вместе с тем и «тип ландшафта, местности и урочища», принятые ранее в советской географии.

В трактовке термина по Милькову исчезала связь инварианта с динамической системой, которую имел в виду В.Б. Сочава в 1978 году. После переосмысления понятия Федором Николаевичем в научной литературе распространяется статическое представление об инварианте, например, в работах В.Н. Бевза, Ф.Н. Милькова, А.Г. Большакова, И. С. Васильева, А. Н. Федорова, С. П. Варламова, Я. И. Торговкина, А. А. Шестаковой инвариант чаще всего представлен литогенной основой, (Мильков, 1986; Бевз, 2002; Большаков, 2004, Васильев, 2009), В.П. Петрищева, А.А. Чибилева, К.М. Ахмеденова, С.К. Рамазонова – почвой (Петрищев, 2011) и т.д. Также отсутствие связи с динамической системой прослеживается в работах А.Н. Ласточкина (Ласточкин, 2016). Статическое представление об инварианте далекое от идей В.Б. Сочавы, но является наиболее общепринятым и в целом воспринимается как весьма абстрактное.

Исходное представление об инварианте, как неизменном на данном интервале времени параметре динамической системы, попытался вернуть Ю.Г. Пузаченко, который проанализировал климатические переменные на глобальном уровне за сто тринадцать лет (Пузаченко, 2010). Он основывался на теории и методах анализа динамических систем, разработанных Германом Хакеном, который ввел представления о параметрах порядка, фактически тождественных инвариантам В.Б. Сочавы, и об управляющих параметрах (Г. Хакен, 1980). В работе о принципах работы головного мозга (Г. Хакен, 2001)

на примере пространственно-временной динамики энцефалограмм приведен пример выделения инвариантов с применением метода главных компонент и его аналогов. Можно утверждать, что идеи В.Б. Сочавы фактически нашли разработку в области динамики сложных систем. А синергетика, безусловно, может рассматриваться как теоретико-методологическое основание для исследования пространственно-временной динамики геосистем.

Представления Ю.Г. Пузаченко продолжили его ученики Р.Б. Сандлерский, М.Ю. Пузаченко, А.Н. Кренке, А.С. Байбар. Используя ряды измерений со спутников Landsat, были рассчитаны инварианты термодинамических переменных на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (Сандлерский, 2007, 2008, 2012; Пузаченко, 2014, 2019; Байбар, 2018).

Анализ иностранной литературы показал, что в англоязычных странах до сих пор отсутствует термин «инвариант ландшафта», принятый в советской географии. Однако, чешскими инженерами J. Bila, J.Jura и I. Bukovsky, разрабатывающими системы мониторинга за состоянием ландшафта, был заимствован математический термин «структурный инвариант» (structural invariant). По их мнению, состояние ландшафта определяется большим количеством переменных, но так, как ландшафтные экологи, физико-географы, как правило, рассматривают не одно конкретное состояние, а их совокупность, для более оперативной работы достаточно выделить инварианты (или тренды) и рассматривать только отклонения от них (Bila, 2007, 2009, 2010). Свою методику они использовали для поиска нарушений функционирования малого водного цикла в экосистеме (Bila, 2010, 2011).

1.2 Инвариант с позиций теории динамических систем. Условия существования инвариантности

Инвариантность – характерная черта природных объектов, обеспечивающая их существование. Учитывая, что в природе нет систем, абсолютно не реагирующих на внешние возмущения, в работе

рассматривается относительная инвариантность, то есть смена состояний происходит в пределах $\pm\epsilon$ и является несущественной (Пузаченко, 1983). Вероятность отклонения функции системы (F) от среднего, за пределы интервала $[F-\epsilon; F+\epsilon]$, может быть оценена через дисперсию.

Рассматривая инвариантность с позиций теории динамических систем, можно выделить несколько условий ее существования, одним из которых является многосвязность. При слабо коррелирующих входных переменных инвариантность функции тем больше, чем больше число аргументов.

$$F = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \dots + a_n X_n,$$

где F- функция системы, X_i – входные аргументы (переменные), a_i – коэффициенты, принадлежащие интервалу $[0;1]$. При $\sum_1^n a_i = 1$ дисперсия функции может быть найдена по формуле:

$$DF = a_1^2 DX_1 + a_2^2 DX_2 + a_3^2 DX_3 + \dots + a_n^2 DX_n,$$

Если дисперсии входных аргументов равны, то минимум дисперсии функции будет достигаться при одинаковых коэффициентах:

$$\min DF = DX_i/n,$$

Однако, если они не равны, то минимум дисперсии функции будет наблюдаться при коэффициентах a_i обратно пропорциональных DX_i . Дисперсия функции, зависящей от нескольких переменных, при неравенстве отклонений всегда заведомо ниже, чем максимальная дисперсия переменных ($DF \leq \max (DX_i)$). Данное утверждение справедливо и при взаимосвязанных аргументах X_i . Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением многосвязности дисперсия функции системы будет меньше при большем количестве аргументов, то есть с большей вероятностью значения будут принадлежать интервалу $\pm\epsilon$. Следовательно, инвариантность системы может быть оценена через количество факторов, определяющих систему, а факторный и дисперсионный анализ, метод главных компонент являются основными статистическими методами, позволяющими оценить инвариантность реально существующих природных объектов.

Согласно принципу многосвязности, сложные системы обладают большей инвариантностью, чем простые. Например, колебания численности животных в тундре или пустыне заведомо больше, чем в сложных геосистемах таких, как широколиственные или южно-таежные леса. Данное утверждение работает и в гидрологии, колебания стока в створе, замыкающем речной бассейн, тем больше, чем проще устроен бассейн, пойма и меньше количество притоков у реки (Пузаченко, 1983). Условие многосвязности для существования инвариантности системы находит место в реальных геосистемах, однако существует ограничение, при чрезмерно большом количестве аргументов система имеет непредсказуемое случайное поведение.

Вторым условием существования инвариантности геосистемы можно считать выполнение принципа компенсирующих связей (принцип двуконалности), предложенный Б.Н. Петровым. Необходимое и достаточное условие реализации инвариантной системы – присутствие двух и более каналов, передающих возмущение, а их эквивалентная компенсирующая функция равна нулю (Чинаев, 1969).

Функция системы F имеет два канала F_1 и F_2 , принимающих из внешней среды сигналы $X_1, \dots, X_n$ с некоторой константой C .

$$F = F_1 + F_2 + C,$$

$$F_1 = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n,$$

$$F_2 = b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n,$$

Значения F остаются постоянными при любых значениях аргументов, если $a_i = -b_i$. В данном случае два канала компенсируют любые возмущения переменных.

Основываясь на определении положения элементов системы в многомерном векторном пространстве, можно сделать еще одно простое, но не менее важное обобщение через скалярное произведение векторов.

$$(a, b) = |a||b|\cos\varphi,$$

$$\cos\varphi = \frac{(a,b)}{|a||b|},$$

Косинус отражает взаиморасположение областей F_1 и F_2 относительно координат векторного пространства (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 Взаиморасположение областей F_1 и F_2 в векторном пространстве

Значение $\cos\varphi$	Взаиморасположение областей F_1 и F_2
$\cos\varphi = 0$	F_1 и F_2 линейно независимы
$\cos\varphi < 0$	Области F_1 и F_2 располагаются в разных половинах многомерного пространства
$\cos\varphi = -1$	Области F_1 и F_2 не пересекаются
$\cos\varphi > 0$	Области F_1 и F_2 располагаются в одной половине многомерного пространства
$\cos\varphi = 1$	Области F_1 и F_2 совпадают

При $\cos\varphi = 0$ отсутствует двухканальная компенсация, при $\cos\varphi < 0$ – компоненты взаимодополняют друг друга, компенсация работает лишь частично, при $\cos\varphi > 0$ – неполная инвариантность за счет многосвязности, а при $\cos\varphi = 1$ – система полностью не инвариантна.

Проверкой принципа компенсирующих связей на растительности в 80-х годах занимались В.С. Скулкин, (1979) и Ю.Г. Пузаченко (1980). Ими были рассмотрены хвойно-широколиственные леса Дальнего Востока, а именно, возобновление кедра корейского (F_1), ели аянской (F_2) и пихты белокорой (F_3). Основными аргументами является возраст (X_1) и сомкнутость (X_2) древостоя, число стволов в древостое (X_3), густота подлеска (X_4), абсолютная высота территории (X_5), экспозиция склонов (X_6), крутизна склонов (X_7), каменистость склона (X_8) (Таблица 1.2).

Таблица 1.2 Взаиморасположение в многомерном пространстве возобновления трех хвойных пород (по Пузаченко, 1972)

Порода	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
F_1	1,25	0,7	1,05	-0,7	1,4	1,2	0,95	-0,9
F_2	-0,5	-0,75	-0,8	1,2	-2,9	-0,8	0,8	0,6

F₂	-0,9	-0,65	-1,25	0,6	1,7	0,9	-0,9	1,1
----------------------	------	-------	-------	-----	-----	-----	------	-----

Таблица 1.3 Нормированные попарные скалярные векторные произведения коэффициентов при аргументах (по Пузаченко, 1972)

Порода	F₁	F₂	F₃
F₁	-	-0,74	-0,38
F₂	-	-	-0,33

Результаты исследования показывают, что три вида хвойных пород деревьев попарно компенсируют друг друга, то есть при всех комбинациях два вида взаимокомпенсируются, а третий встречается в виде подроста, для которого характерны высокие показатели обилия. В данном исследовании, ель аянская и кедр корейский являются взаимодополняющими, а им противопоставляется пихта белокорая, поэтому в реальных биоценозах будут встречаться сочетания пихты с елью или пихты с кедром (Таблица 1.3). В целом, хвойно-широколиственные леса юга Дальнего Востока характеризуются средней степенью инвариантности, то есть они являются устойчивыми, но существуют возмущения, которые способны привести к смене состояния системы. В их работах доказано, что принцип многоканальной компенсации возмущения из внешней среды можно считать одним из главных способов, способствующий инвариантности основных функций биоценозов и фитоценозов.

Итак, инвариантность систем базируется на двух принципах: многосвязности и многоканальной компенсации внешних возмущений, несоблюдение которых приводит к интенсивным преобразованиям системы и последующему формированию новой инвариантной системы.

1.3 Методы выделения инвариантов, параметров порядка, главных компонент

Несмотря на то, что понятие инвариант получило широкое применение, долгое время не было единой методики его расчета. Только у отдельных направлений географии, где присутствовали ряды временных, пространственных или пространственно-временных данных, были предприняты попытки их выделения, например, в гидрологии термин инвариант близок к понятию норма - некому осреднению, которое рассчитывается как среднеарифметическое значение. Одним из возможных методов получения инвариантов (параметров порядка) является метод главных компонент (*Principal Component Analysis – PCA*), который был изобретен Карлом Пирсоном еще в 1901 году, но не потерял своей актуальности и на сегодняшний день. С его помощью можно выделить ортогональные, взаимонезависимые отображения множества измерений на виртуальные факторы или главные компоненты (Pirson, 1901).

Как было сказано ранее, данный метод был использован в своих исследованиях Германом Хаккенем (2003, 2005) в синергетике. Однако, PCA получил применение и в других науках и прикладных задачах. Он используется в политических исследованиях (Labrin et al, 2020); социологических, например, при помощи главных компонент произведена классификация стран по уровню счастья после пандемии на основе данных всемирного социологического опроса 2021 года (Greenacre et al, 2022); биологических – один из методов оценки повторяемости в генетике (Abeywardena, 1972; Reich et al, 2008) и т.д. PCA нашел свое применение даже в спорте, с его помощью можно количественно оценить технику спортсменов, рассматривая ее как набор пространственно-временных переменных, движения лыжников можно записать как изменение трехмерных координат во времени (Federolf et al, 2014). Еще одним ярким примером выделения инвариантов методом главных компонент можно считать технологию Face ID (распознавание лица человека) (Chan et al, 2010; Bahurupi et al, 2012; Javed, 2013).

Так как в разный момент времени у нас может изменяться мимика, угол наклона головы, появляться или отсутствовать макияж, съёмочной системой делается ряд снимков и выделяется инвариант – набор устойчивых черт лица, по которым можно идентифицировать человека. По мнению Н. Бакши и его коллег PCA – универсальный метод для распознавания лиц ввиду его оперативности и меньшей чувствительности к шуму и помехам (Bakshi et al, 2017). В Малайзии как в стране с процветающей преступностью нарушители закона давно научились избегать идентификации по отпечаткам пальца, все больше применяются распознавание преступников по инвариантам лица, полученным по снимкам и видеозаписям с общественных камер. В 80% случаев на городских видеозаписях можно распознать инварианты лица преступников (Abdullah et al, 2017).

Метод главных компонент широко используется и в географии: социально-экономической (Johnston, 1978; Griffith, Amrhein 1997; Cartone et al, 2021; Libório et al, 2022) и физической (Mather, 1976; Legendre, Legendre, 1998; Davis, 2002). Ирландские ученые во главе с Демшар выделяют 4 группы применения PCA в географии: 1. для анализа пространственных явлений и объектов в социально-экономической географии, 2. для анализа растровых изображений, 3. для атмосферных исследований, 4. для анализа потоков (гидрология) (Demšar et al, 2012). Однако, можно еще выделить группу экологических исследований, например, применение PCA помогает обнаружить многомерные пространственные сбросы и выбросы при анализе химического состава вод и воздуха (Hubert et al, 2005; Filzmoser et al, 2008; Harris et al, 2015), почв (Kaspari et al, 2009); биогеографических (анализ численности видов) (Legendre, Gallagher, 2001); почвенных (анализ свойств почвенных горизонтов для классификации) (Dragović et al, 2006; Levi, Rasmussen, 2014; Maynard, Johnson, 2016); геолого-геоморфологических (Sharma et al, 2009; Huang et al, 2020). Также можно выделить междисциплинарные исследования, например использование PCA для выделения пространственно-временных индексов социально-экономически-

экологической уязвимости территории южной Африки (Abson et al, 2012), прибрежных районов Бангладеш (Uddin et al, 2019) и т.д.

Рассмотрим применение метода главных компонент для выделения параметров порядка рельефа и мультиспектральной дистанционной информации.

1.4 Использование метода главных компонент для выделения параметров порядка рельефа

При анализе рельефа ряд ученых сталкиваются с проблемой выбора набора переменных, так как рассчитываемые характеристики являются производными от одной и той же ЦМР, они могут быть закоррелированы и вызывать избыточность в анализе (Pittman et al, 2009). Например, корреляция между характеристикой уклона и шероховатости территории может быть даже более 0,9 (Rooper, Zimmermann, 2007). Несмотря на то, что от выбора набора переменных зависит качество статистических моделей (Hijmans, 2012, Dormann et al, 2013), оценка ковариации между морфометрическими характеристиками рельефа проводится редко (Graham, 2003). Однако, с увеличением количества морфометрики, которую можно рассчитать в различных пакетах программ, данная проблема становится еще более актуальной. Один из возможных путей ее решения – применение метода главных компонент (*Principal Component Analysis - PCA*), который широко используется для анализа рельефа лессовых плато Китая (Zhang et al, 2009; Tang et al, 2020; Huang et al, 2020; Liu et al, 2022), территории Вьетнама (Nguyen et al, 2020), США (Officer et al, 2004), Канады (Lecours et al, 2017), Индии (Mishra, Satyanarayana, 1988; Sharma et al, 2009; Singh et al, 2009; Meshram, Sharma, 2018; Tiwari, Kushwaha, 2021) и других стран.

Анализ литературы показал, что PCA преимущественно используется для обобщения малого количества переменных (3 – 4 характеристики). Например, американские коллеги выделили параметры порядка для 4 участков в штате Иллинойс и Миссури на основе 4 морфометрических характеристик

рельефа (высота, крутизна склонов, кривизна и показатель конвергенции). В общей сложности ими было получено 2 главных компонента, которые описывают 72% 16 переменных (4 территории исследования по 4 показателя). Первый компонент для всех участков положительно связан с высотой и кривизной и отрицательно с показателем конвергенции, второй компонент характеризует крутизну склонов (Officer et al, 2004).

Большее количество морфометрических переменных рассматривают китайские ученые. Для территории Восточного Китая на основе ЦМР с разрешением 100 м в ArcGis 10.2 рассчитаны 10 морфометрических параметров: абсолютная высота территории, плановая и профильная кривизна, крутизна склонов, амплитуда рельефа, шероховатость поверхности, глубина расчленённости поверхности, плотность овражно-балочной сети, коэффициент вариации высоты, длина склона. Их обобщение методом главных компонентов показало, что первые пять параметров порядка рельефа описывают почти 92% значений всех переменных (1 – 55%, 2 – 12%, 3 – 10%, 4 – 9%, 5 – 6%). (Huang et al, 2020) (Таблица 1.4).

Таблица 1.4 Главные компоненты 10 морфометрических характеристик рельефа Восточного Китая (Huang et al, 2020)

	F1	F2	F3	F4	F5
Абсолютная высота	0.780	-0.477	0.019	0.180	0.036
Крутизна	0.961	0.036	-0.085	0.066	-0.091
Плановая кривизна	- 0.238	-0.107	0.927	0.198	-0.140
Профильная кривизна	0.724	0.044	0.251	- 0.019	0.534
Амплитуда рельефа	0.956	0.059	0.068	0.062	-0.130
Шероховатость поверхности	0.944	0.021	0.063	0.090	-0.147
Глубина расчленённости поверхности	0.859	0.014	-0.131	0.159	-0.317
Плотность овражно-балочной сети	- 0.272	0.477	-0.127	0.812	0.134
Уклоны	0.316	0.840	0.187	- 0.335	-0.103
Длина склонов	0.829	0.067	0.001	- 0.118	0.294

Таким образом, выявлена тесная связь между показателями крутизны склонов, амплитудой рельефа и шероховатостью поверхности, в то время как профильная и плановая кривизна, уклоны и плотность овражно-балочной сети являются независимыми показателями - маркерами (Huang et al, 2020). Аналогичные результаты были получены и для центральных районов Китая (Zhang et al, 2009; Tang et al, 2020; Liu et al, 2022).

Помимо выбора набора характеристик существует еще одна проблема, связанная с применением различного программного обеспечения, одни и те же характеристики могут иметь отличные друг от друга алгоритмы расчета, например в SAGA GIS и Arc GIS. Канадские ученые Лекур и коллеги выполнили интеграцию группы морфометрических характеристик, рассчитанных в 11 программных пакетах (Таблица 1.5) (Lecours et al, 2017). Так же была проведена оценка влияния сложности рельефа на результаты применения метода главных компонент, для этого были построены искусственные поверхности рельефа с различной фрактальной размерностью. Основная же цель данного исследования – это выделение набора маркерных переменных, которые нагружают только один главный компонент, если характеристики рельефа «висят» на разных факторах, то они являются избыточными в экологических исследованиях и не могут быть применены для статистических расчетов (Tabachnick et al, 2014).

Таблица 1.5 Количество различных морфометрических параметров в разных программах

ПО	Количество рассчитываемых морфометрических параметров	ПО	Количество рассчитываемых морфометрических параметров
ArcGIS 10.2.2 with Python 2.7.8	22	Quantum GIS 2.4.0 Chugiak	13
ArcGIS 10.2.2 with DEM Surface Tools (v.2.1.399)	17	SAGA GIS 2.0.8	96
ArcGIS 10.2.2 with Benthic Terrain Modeler 3.0 rc3	12	TNTmips Free 2014 (MicroImages)	25

Diva-GIS 7.5.0	7	uDig 1.4.0b	9
Idrisi Selva 17.0	7	Whitebox GAT 3.2.1 Iguazu	10
LandSerf 2.3	12	Итог	230

Из 230 переменных 48 оказались одинаковыми и сразу были извлечены из анализа. К оставшимся 182 переменным был применен метод главных компонент и выделены 6 групп показателей с главными характеристиками: (1) относительная разница высоты со средним значением (мера относительного положения), (2) локальное стандартное отклонение (мера морщинистости), (3) восточность и (4) северность (меры ориентации), (5) местное среднее значение (показатель среднего уклона) и (6) уклоны (предпочтительно рассчитанные с помощью метода Хорна). Показано, что профильная кривизна самая нескоррелированная переменная и имеет наибольшие факторные нагрузки. Обнаружено, что происходит перестройка факторного пространства при фрактальной размерности 2,4. Сделан вывод, что в разных пакетах программ одни и те же характеристики могут называться по-разному, а одноименные различаться, поэтому необходимо всегда читать информационную справку о алгоритме расчета. Все морфометрические переменные, рассчитанные в Quantum GIS, вошли в итоговый набор характеристик и меньше всего (50%) полученных в LandSerf.

Анализ литературы показал, что преимущественно все исследования сводятся к оценке сложности рельефа, а выделение главных компонент – это процесс расчета интегральных морфометрических характеристик. Однако, можно выделить ряд работ коллег из Индии, где широко стоит водная проблема, почти каждое лето там наблюдается засуха и население гибнет от нехватки питьевой воды. В этой связи, особенно актуальны работы на стыке геоморфологии и гидрологии. Таким образом, РСА используется для интеграции морфометрических характеристик водораздела (уклон, коэффициент рельефа, относительная высота рельефа, уклон русла основного водотока, коэффициент «удлинения», коэффициент формы бассейна,

отношение длины и ширины водораздела, коэффициент длины потока, коэффициент бифуркации, отношение длины окружности той же площади что и водораздел к периметру водораздела и т.д.), а полученные компоненты применяются для гидрологического моделирования (Mishra, Satyanarayana, 1988; Sharma et al, 2009; Singh et al, 2009; Meshram, Sharma, 2018; Tiwari, Kushwaha, 2021).

Примерами применения PCA относительно характеристик рельефа для конкретных задач можно считать использование главных компонент для оценки подверженности наводнениям территории Ямайки (Nandi et al, 2016), для моделирования цунами на западном побережье Кореи (Ha et al, 2014), оценка оползневой опасности на Восточных склонах Гималаев (Rawat, Joshi, 2012) и т.д.

Таким образом, проведя анализ зарубежной литературы по использованию метода главных компонент относительно морфометрических параметров рельефа, можно сделать вывод, что почти во всех работах ученые бездумно применяют PCA, а полученные результаты не верифицируют. Основная цель этих исследований – сокращение числа переменных для дальнейшего анализа и выявление набора некоррелированных характеристик рельефа. Как правило, статьи воспринимаются как «инструкция к стиральной машинке», описывает только технические аспекты. И только в ограниченном количестве статей прописаны реальные прикладные цели применения PCA.

1.5 Использование метода главных компонент для выделения инвариантов мультиспектральных данных дистанционного зондирования

Мультиспектральные изображения дистанционного зондирования часто имеют обширную междиапазонную корреляцию. В результате каналы съемки изображения могут содержать схожую информацию и иметь идентичную пространственную структуру. Анализ главных компонент — это метод

удаления или уменьшения дублирования информации в мультиспектральных изображениях, а также для сжатия всей информации, содержащейся в исходном n-канальном наборе мультиспектральных изображений, в менее чем n параметров порядка (Avena et al, 1999). Таким образом, далее возможно их использование вместо исходных данных для анализа и интерпретации космических снимков.

Анализ литературы показал, что всю историю использования метода главных компонент для анализа мультиспектральной дистанционной информации можно подразделить на 3 этапа.

Первый этап берет свое начало с середины 70-х годов и связан с обобщением каналов одного снимка. В 1975, 1976 году целый ряд ученых из разных стран впервые публикует работы о использовании метода главных компонент для интеграции каналов снимка, полученного съемочной системой Landsat (Fontanel et al, 1975; Abotteen, 1976; Kauth, Thomas, 1976; Meijerink, 1976; Rifman et al., 1976; Longshaw, 1976). Ими было показано, что для анализа данных можно использовать не все каналы, а только несколько первых главных компонент, на которые приходится более 90%. Данные работы стали спусковым крючком и после них появился целый ряд однотипных работ для разных территорий и типов землепользования. Например, для части округа Принс-Джордж (штат Мэриленд, США) было получено, что первых три компонента описывают 94,2%. (Williams, Borden, 1977). Для урбанизированной территории городов Китченер, Ватерлоо, Кембридж и Гвелф четыре компонента описывают 100% информации, в то время как на первых 2 компонента приходится 95%. Первый имеет положительную связь со всеми каналами, второй показывает разницу между видимыми каналами спектра и инфракрасными, третий и четвертый связаны с шумом съемочной системы (Fung, LeDrew, 1987). Для сельскохозяйственных полей также важны первые 2 компонента (общая яркость и зеленость) (Misra, Wheeler, 1978).

Таким образом, для первого этапа характерно использование единичных снимков, обобщение каналов которых дает 2 – 3 компоненты:

общая яркость, зеленость (Ingebritsen, Lyon, 1985), влажность (Campbell, Congalton, 2012). Как правило, полученные первые три компонента использовались для создания композитов снимков Landsat и подставлялись вместо значений RGB, и на основе этого делалась классификация территории исследования (Fontanel et al, 1975).

Второй этап был преимущественно в 80-х гг. XX века – в начале 00-х годов XXI века, однако встречаются и более поздние работы, например (Estornell et al, 2013). Для него характерно использование метода главных компонент для обработки уже нескольких космических снимков, но так как, ученые к этому моменту еще не сумели накопить временную серию безоблачных снимков, то, как правило, использовали 2 (Byrne et al, 1980; Conese et al, 1988; Li, Yeh, 1998; Estornell et al, 2013), 3 (Fung, LeDrew, 1987; Jiaju, 1988), 4 сцены (Munyati, 2004). Основная идея состоит в том, что главные компоненты ранжированы по величине дисперсии, которую они объясняют, следовательно, полученные параметры порядка демонстрируют заметно отличающуюся друг от друга пространственную структуру (Avena et al, 1999) и, таким образом, можно зафиксировать изменения ландшафтного покрова в пространстве. Поэтому, как правило, PCA применялся ко всем каналам разновременных снимков и в результате выделялись динамические компоненты, которые связаны с сезонной ходом растительности (Byrne et al, 1980; Fung, LeDrew, 1987), разрастанием городов (Chang, Yoon, 2003), пожарами (Koutsias et al, 2009), уменьшением площади водно-болотных угодий (Munyati., 2004) и т.д.

Таким образом, второй этап – это время попыток выйти на использование метода главных компонент для оценки преимущественно динамической составляющей, но осложненное отсутствием большого количества безоблачных снимков для анализа. Впервые предпринимаются попытки выделить инвариантную составляющую за временной период для картографирования, например, использование инвариантов за 2 срока, чтобы сделать классификацию лесов Италии (Conese et al, 1988).

После второго этапа можно выделить период простоя, примерно 10 – 20 лет не выходило новых работ, малое количество снимков уже проанализировано, а для нового скачка нужно было накапливать временные серии безоблачных сцен, что удалось сделать примерно к 2015 – 2017 году. Однако, это время совпало с «модой» на спектральные индексы, к этому времени одних только вегетационных индексов насчитывалось более 160. Поэтому третий этап – накоплены временные ряды мультиспектральных данных, однако ученые ушли от обобщения каналов, перешли сразу к применению PCA для спектральных индексов. Все работы этого периода можно подразделить на 2 группы: обобщение водных индексов или вегетационных. Примером использования метода главных компонент для влажностных индексов может служить работа по картированию водных объектов в Венгрии на основе классификации случайного леса (*Random Forest*). Показано, что если использовать исходные каналы, то точность классификации составляет 93%, совокупность водных индексов – 60 -70%, модифицированный нормализованный дифференцированный индекс воды (MNDWI) – 98%, главные компоненты каналов сцен Landsat – 99%. Таким образом, сделан вывод о том, что использование PCA относительно каналов снимков дает наилучшее распознавание водных объектов, поэтому может быть использовано в качестве основы для их картографирования (Balázs et al, 2018).

Аналогичные исследования проведены и для водно-болотных угодий в Бразилии. Были обобщены влажностные индексы всех безоблачных снимков с 2001 по 2012 год и получено, что первых 3 компоненты описывают 99% всех значений индексов за 11 лет и могут быть использованы для классификации территории (de Almeida et al, 2015).

Предпосылками для использования PCA применимо к вегетационным индексам, рассчитанным по снимкам Landsat, можно считать исследования по снимкам AVHRR. Так, с 1981 года метод главных компонент систематически применялся к временным рядам вегетационных индексов снимков AVHRR с целью крупномасштабных фенологических исследований, например,

(Townshend et al, 1985; Eastman, Fulk, 1993; Hirose et al, 1996; Hall-Beyer, 2003; Ferreira, Huete, 2004; Mbongo et al, 2013). Как правило, на первый компонент нагрузки распределяются равномерно и с одинаковым знаком, выделяя инварианты фотосинтеза для всего года. В то время как для второго характерен синусоидальный годовой ход, с разными знаками выделяются сезоны года. Третий компонент может так же отражать сезонность, но обычно связан с более локализованными фенологическими паттернами (Eastman, Fulk, 1993). Например, для территории Африки обобщили NDVI серии снимков AVHRR за 3 года. Получено, что первый инвариант характерен для всего года, 2, 3, 4 инвариант - с сезонами года, 5 и 6 - с ошибками съемочной системы, 7 и 8 демонстрируют аномалии из-за Эль-Ниньо (Eastman, Fulk, 1993).

Так же метод главных компонент получил широкое применение относительно вегетационных индексов, полученных различными съемочными системами: Spot (Fung, Siu, 2000; Lasaponara, 2006; Amri et al, 2011), MODIS (Hall-Beyer, 2003; Sun et al, 2010; Wang et al, 2010; Antico, 2012; Parmentier, 2014; de Almeida et al, 2015; Bellón et al, 2017; Indriasari et al, 2024) и т.д. В большинстве работ основная цель – это выделение динамической составляющей, какие произошли пространственные изменения за временной интервал. Однако, Пармантье и коллеги изучали территорию Аляски, где произошли пожары, но они ставили перед собой основную задачу, не диагностировать места пожара, а выделить инвариант территории, на котором, по их мнению, содержится информация не только о наличии пожаров, но и о предпосылках их возникновения. Так, они применили PCA к NDVI, температуре поверхности и альбедо территории, полученным по снимкам за 2001 – 2009 год MODIS. На первый инвариант приходится 35% и для него характерно уменьшение альбедо, температуры и увеличение вегетационного индекса, он положителен для постпирогенных земель и отрицательный для нетронутых пожаром участков. Второй инвариант связан с возрастом гарей, положительный для старых (увеличение NDVI, уменьшение температуры и альбедо) и отрицательный для свежих (уменьшение NDVI, увеличение

температуры и альбедо). Таким образом, первый инвариант противопоставляет постпирогенные территории и без пожаров, а второй – старые и свежие гари (Parmentier, 2014).

Ввиду доступности снимков и пространственного разрешения в 30 метров снимки Landsat широко используются для выделения инвариантов и динамических составляющих по вегетационным индексам (Lanorte et al, 2015; Abuelgasim, Ammad 2017; Bellón et al, 2017; Dasu et al, 2019; Pesaresi et al, 2020; Dharani et al, 2021).

Большинство работ связано с картографированием растительности на основе инвариантов вегетационных индексов, особенно много таких работ для северных и центральных районов Италии. Песареси с коллегами выделили инварианты вегетационных индексов по снимкам Landsat 8 с 2013 по 2019 год (9 изображений в 2013 г., 14 изображений в 2014 г., 15 изображений в 2015 г., 12 изображений 2016 г., 17 изображений 2017 г., 16 изображений 2018 г. и 6 изображений в 2019 г.). Полученные параметры порядка, по их мнению, содержат полные характеристики среды обитания, а их сравнение с современными снимками отражает современную динамику растительного покрова. Так же они использовали морфометрические характеристики рельефа, рассчитанные в SAGA GIS на основе ЦМР с разрешением 30 метров. Полученные инварианты NDVI и морфометрика были использованы как основа для классификации Random Forest. Растительные ассоциации были выделены благодаря кластерному анализу полевых данных. Итог работы – карта распределения 4 основных растительных ассоциаций (Рисунок 1.1) (Pesaresi et al, 2020). Таким образом, можно утверждать, что данная работа достаточна близка к теме диссертационного исследования, однако она построена на основе спектральных индексов и не учтена роль иерархии рельефа.

Изучив зарубежную литературу о использовании метода главных компонент для анализа мультиспектральной дистанционной информации, можно сделать ряд выводов. Во-первых, применение РСА для обработки

МДДЗ начало зарождаться в конце 80-х - начале 90-х гг., однако не получило распространения ввиду отсутствия временной серии безоблачных снимков, в самых первых работах методом главных компонент обобщались каналы одного снимка, затем, как правило, анализировалось 2, максимум 4 снимка.

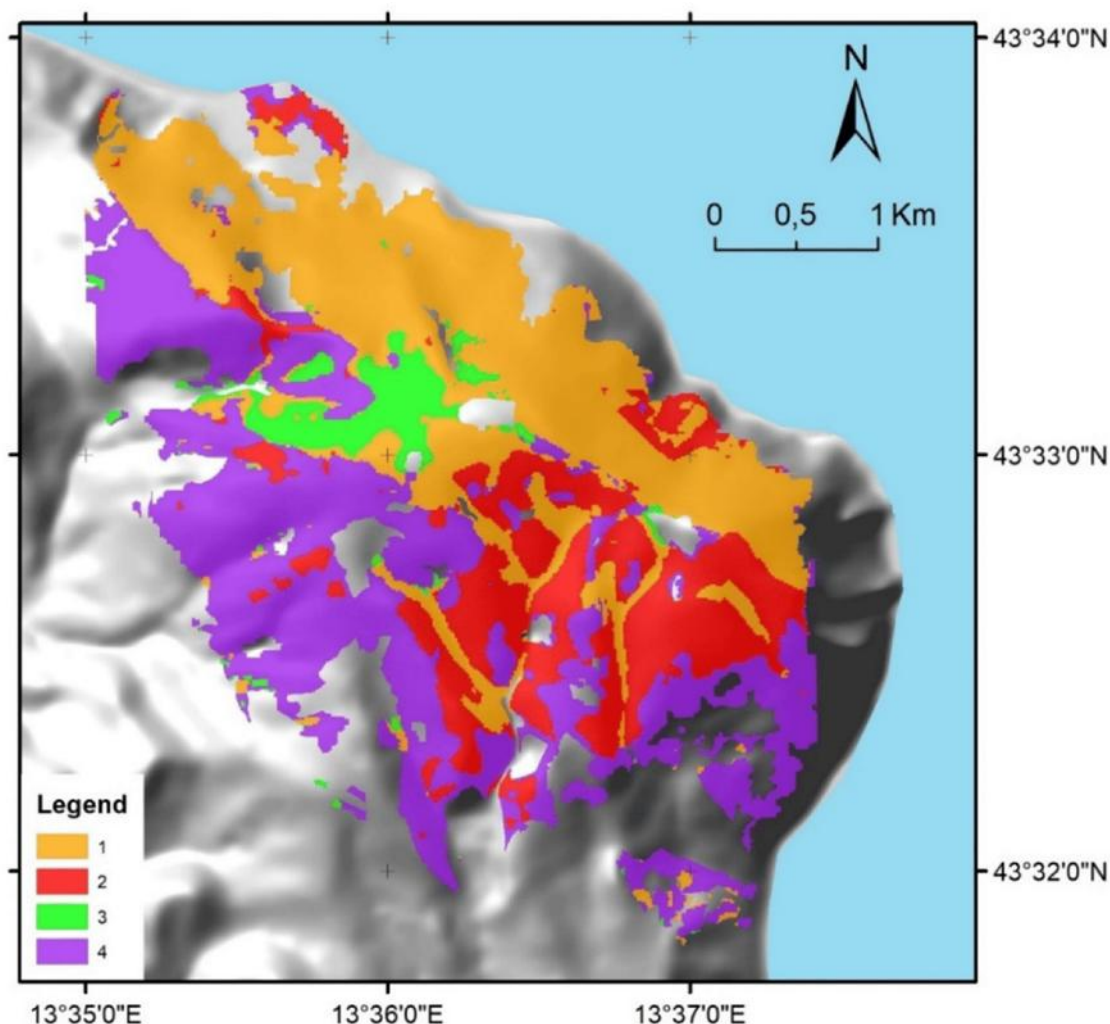


Рисунок 1.1 Центральная Италия Легенда (Растительные ассоциации):
 1- *Cephalanthero longifoliae*-*Quercetum ilicis*; 2- *Cyclamino hederifolii*-*Quercetum ilicis*; 3- *Asparago acutifolii*-*Ostryteum carpinifoliae*; 4- Платации *Pinus halepensis* и *P. pinea*. (Pesaresi et al, 2020)

Однако, по нескольким снимкам нельзя сделать выводов, особенно по динамике. Они могут быть ошибочны. Так, например, Бурне с коллегами применили РСА к 8 каналам 2 сцен, полученных 6 апреля 1972 и 13 октября 1975 года, и получили, что сезонные различия гораздо ярче проявляются, чем локальные изменения ландшафтного покрова. Первые два параметра порядка хорошо коррелируют со всеми сроками съемки, а 3 и 4 показывают изменения

между сроками (Byrne et al, 1980). Фунг и ЛеДрю обобщили методом главных компонент 3 срока: 19 августа 1981, 10 апреля 1984, 24 августа 1984 года и получили 4 параметра порядка: 1 – инвариант яркости, 2 – изменения зелености, 3 – инвариант влажности, 4 - изменения яркости. Сделаны выводы о том, что использование РСА помогает выделить сезонную динамику, так как в начале апреле значения инварианта яркости больше, зелености меньше, а в августе противоположная ситуация (Fung, LeDrew, 1987). Соответственно, в этих работах сделаны выводы, которые нельзя получить по 2 - 3 снимкам, к тому же, сравнивая апрельские, когда вся поверхность покрыта талой водой, и августовские сроки наблюдения.

И только через почти два десятилетия предпринимаются попытки вернуться к данному методу, так как накопились временные ряды МДДЗ. Конец 10-х годов XXI века – время активной разработки спектральных индексов, поэтому выделялись или инварианты фотосинтеза (NDVI, VI, EVI), или влажностные (NDWI, MDWI, WRI). Ученые из разных стран отошли от использования информации непосредственно каналов, хотя в работе (Balázs et al, 2018) демонстрируется, что максимальной точности распознавания водно-болотных угодий Венгрии можно достичь только благодаря классификации на основе главных компонент каналов, а не водных индексов. Таким образом, можно говорить, что расчет спектральных индексов бессмыслен, когда исходные каналы содержат больше информации.

Во-вторых, можно утверждать, что в рассмотренных работах основное содержание выглядит как *инструкция* применения метода главных компонент, технические особенности, при этом нет объяснения физического смысла на каждом этапе анализа. Потеряна связь с реальной природой.

Частные методы расчета инвариантов мультиспектральных дистанционных данных

Если рассматривать инварианты как некоторое интегральные, эталонные изображения, то в частном случае, они могут быть выделены с

помощью различных подходов в зависимости от задач, для которых они рассчитываются.

Во-первых, “image compositing”, что дословно можно перевести как компоновка изображений, построение составного безоблачного изображения с целью уменьшения объема данных спутниковой информации и минимизации атмосферного влияния. Алгоритмы для расчета такого изображения преимущественно проработаны для снимков с низким пространственным разрешением, например, для AVHRR (Holben, 1986) и MODIS (Luo et al., 2008), однако, существуют исследования, реализованные и предназначенные для съемки Landsat (Griffiths et al., 2013; Potapov et al., 2011; Roy et al., 2010; White et al., 2014; Zhu et al., 2015b). Первый алгоритм для Landsat был разработан Ройем и его коллегами (Roy et al., 2010) 2010 год), он применялся к изображениям, полученным съемочной системой ETM+ (Landsat 7) для всей территории США. Метод основывается на совместном использовании максимальных значений нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) и яркостной температуры (Brightness temperature). Однако, уже через год Потапов с коллегами (Potapov et al., 2011) предложил использовать медианные значения ближнего инфракрасного канала (NIR) в качестве критерия для отбора «идеальных» наблюдений вместо максимального NDVI. Дальнейшие исследования методов построения комбинированного изображения связано с разработкой бальной системы оценивая снимков Landsat. Например, Гриффитс с соавторами (Griffiths et al., 2013) предложили оценивать каждое наблюдение со спутника, а компоновку изображения осуществлять на основе взвешенных баллов. В данном подходе основными критериями можно считать дату (год и день в году), расстояние каждого пикселя от облака (из Fmask) (Griffiths et al., 2013). Дополнительные критерии предложил Вайт и др. соавторами (White et al., 2014), по его мнению, дополнительно нужно учитывать тип датчика, расстояние от пикселя до тени облака и непрозрачность атмосферы (из LEDAPS) (White et al., 2014). Чжу и др. предложили использовать все безоблачные снимки Landsat для оценки

серии временных данных для каждого пикселя и канала, с помощью которых можно выполнять прогноз ежедневных синтетических данных Landsat при условии чистого неба (Zhu et al., 2015).

Во-вторых, “image fusion” – слияние изображений с целью улучшения пространственного разрешения (Коберниченко, Тренихин, 2007). Можно выделить несколько основных методов получения интегрального изображения: метод главных компонент (Principle component analysis (PCA)) (Kwarteng, Chavez, 1989; Cao et al, 2003; Chang, Yoon, 2003; Riasati, Zhou, 2005; Naidu, Raol, 2008; Metwalli et al., 2010; Shahdoosti, Ghassemian, 2012; Campbell, Congalton, 2012; Yonghong, 2012), преобразование интенсивность - оттенок - насыщенность (Intensity-hue-saturation (IHS)) (Tu et al, 2001a, 2001b; Choi, 2006), преобразование Брови (Brovey transform), вейвлет-преобразование (Wavelet transform) (Nunez et al., 1999; Naidu Raol., 2008; Nunez, 1999) и т.д. Данные методы, как правило, используются для объединения мультиспектральных и панхроматических каналов с целью получения цветного изображения с высоким разрешением.

Таким образом, продемонстрированы основные способы получения интегрирующего композита снимков, который только от части можно назвать инвариантом, по большей мере, они отражают некую «идеальную картинку» за рассматриваемый временной интервал.

Глава 2 Физико-географическая характеристика территории

Территория исследования – ядро, охранный зона Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (ЦЛГЗ) и прилегающая территория, на которой ведется антропогенная деятельность. Таким образом, мы можем сопоставить различные типы коренных и антропогенных биогеоценозов. Исследование проводится для прямоугольника с координатами углов: 32.607781 в.д., 56.682393 с.ш., 33.230169 в.д., 56.682798 с.ш., 32.611149 в.д., 56.354927 с.ш., 33.228192 в.д., 56.355327 с.ш.. Общая площадь территории составила 139 200 га, площадь ядра - 24 320 га, охранный зоны - 46 440 и прилегающей территории - 68 440 га (в границах 2023 года).

Центрально-Лесной заповедник расположен в юго-западной части Валдайской возвышенности, на Каспийско-Балтийско-Черноморском водоразделе Русской равнины. Здесь сохранились уникальные массивы коренных южно-таежных ельников, нетронутые рубками. Территория исследования расположена в трех административных районах Тверской области: в Нелидовском, Андреапольском и Селижаровском районах (Рисунок 2.1)

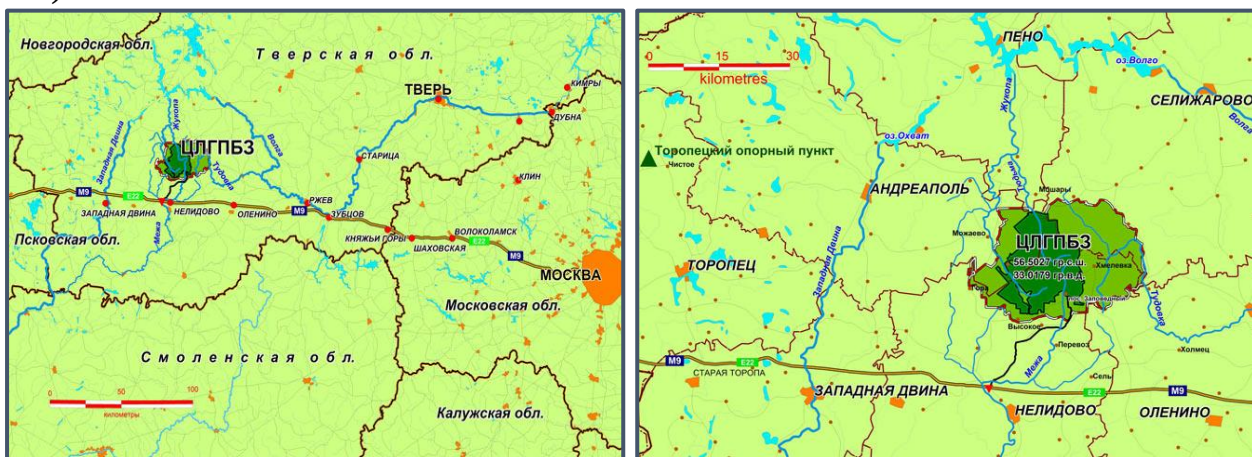


Рисунок 2.1 Расположение Центрально-Лесного заповедника
(Источник: <https://clgz.ru>)

Согласно физико-географическому районированию Русской равнины по Ф.Н. Милькову и Н.А. Гвоздецкому, территория относится к Белорусско-Валдайской провинции ландшафтной зоны смешанных лесов (Мильков, Гвоздецкий, 1976). По А.А. Макуниной - в лесном типе ландшафта

умеренного пояса, в переходной области между таежным подтипом и подтипом со смешанными и широколиственными лесами (Макунина, 1985). По А.Г. Исаченко, ландшафт заповедника относится к «умеренно континентальным переходным к суббореальным ландшафтам на холмистоморенных возвышенностях в области валдайского оледенения» (Исаченко, 1985, стр. 168).



Рисунок 2.2 Границы исследуемой территории (на 2023 год)

2.1 Геолого-геоморфологическая характеристика территории

Геологическое строение Территория исследования расположена в пределах московской синеклизы (Почвено-геологические условия..., 1984), на древнем структурном плато между Селижаровской и Нелидовской депрессиями палеозойского времени, на Нелидово-Оршанского мегаблоке, медленно поднимающемся с позднего палеогена (Бабак и др., 1984; Центрально-Лесной..., 2007). Мегаблок состоит из совокупности блоков

меньшего порядка, для которых характерна разная вертикальная скорость поднятия, и рассекается серией тектонических разломов. Наиболее выражен разлом на западе охранной зоны, он представлен долиной реки Жукопа и чередой линейно упорядоченных верховых болот (Демиховский Мох, Стуловский Мох, Мухояровский Мох) (Рисунок 2.5, 2.6). Еще один разлом расположен на востоке, северо-востоке и дешифрируется долиной реки Тудовка (Пузаченко, Козлов, 2007) (Рисунок 2.6). Таким образом, тектонические разломы отражаются и на строении четвертичного чехла, следовательно, оказали влияние на современную структуру территории.

На протяжении геологической истории территория претерпевала как опускания, сопровождавшиеся трансгрессией моря, так и поднятиями, в ходе которых некоторые участки высвобождались от него. В морские этапы развития территории здесь сформировались осадочные породы такие, как доломиты, известняки, глины. По мнению Лехт и Гудковой, мощность известняков менее 80 м (1986). На геологической карте атласа Калининской области 1964 года преимущественно вся территория относится к Серпуховской свите (известняки), обрамленная Окской свитой (известняки, пески, глины с линзами бурого угля). Правобережье р. Межи представлено Каширским горизонтом (доломитовая толща) и сменяющим его Подольским горизонтом (известняки и мергели) (Атлас Калининской..., 1964). Однако, в более поздних геологических картах дается более детальное разделение каменноугольных отложений. Согласно геологической карте дочетвертичных отложений Тверской области (1998) в западной части территории исследования преобладают отложения Каменноугольной системы, нижнего отдела, представленные известняками, доломитами, глинами, песками и алевроитами Веневского горизонта с мощностью 12 – 18 метров. К северу, югу и западу они сменяются осадочными породами Михайловского горизонта (20 -24 метра) и Алексинского горизонта (15 – 25 метров). К западу от долины реки Межи встречается Тарусский и Стешевский горизонт с известняками, мергелями, глинами, доломитами до 25 метров. К западу от р. Межи

последовательно сменяются Тарусский горизонт (известняки, доломиты до 20 метров), Стешевский горизонт (глины, мергели, известняки до 25 метров), Протвинский горизонт (известняки, доломиты, мергели глины со средней мощностью 16 – 35 метров и максимальной 64 метра). У истоков реки Тудовка встречается Вере́йский горизонт, представленный пестроцветными глинами, песками, песчаниками и известняками до 30 метров, и Каширский горизонт с доломитами, известняками с прослоями мергелей, глин, кремней (18-30 метров) (Рисунок 2.3). К западу от территории исследования Карбоновое плато сменяется Девонской низиной, уступ между ними получил название Карбоновый уступ, представленный сильно выположенным ступенчатым склоном с высотой 70 – 80 метров (Чеботарева и др., 1961). К востоку Карбоновое плато граничит с Пермской низиной.

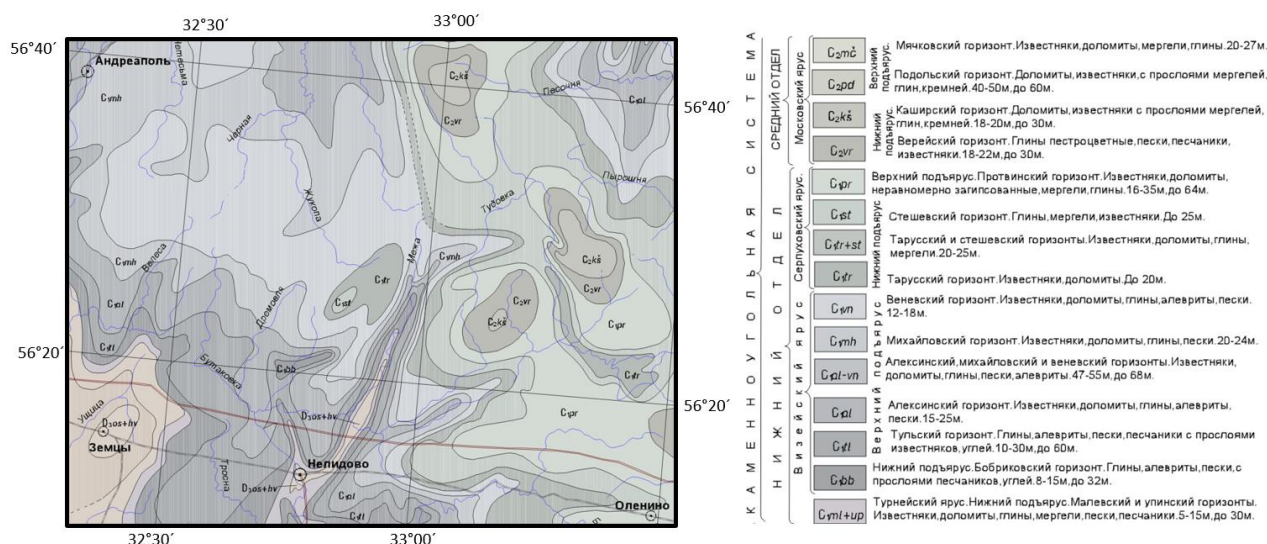


Рисунок 2.3 Фрагмент геологической карты дочетвертичных отложений Тверской области (Составители И.И. Мещерякова, Е.С. Артемьева, Л.И. Фадеева)

В мезозойскую и кайнозойскую эру эродировались породы, сформировавшиеся на ранних этапах, и образовывались терригенные отложения.

Фундамент дочетвертичного времени оказал значительное влияние на распространение оледенений. Несмотря на то, что Карбоновое плато не было препятствием для окского, днепровского и московского оледенений, оно как

выпуклая форма претерпевало в основном экзарационное воздействие. Таким образом, наиболее возвышенные участки плато и его краевые части имеют мощность четвертичных отложений всего несколько метров и на них протекают карстовые процессы, например, на болоте Катин Мох (Рисунок 2.6). Так же коренные породы вскрываются в долинах рек Ночны, Жукопы, Тудовки (Рисунок 2.3, 2.6). В среднем мощность четвертичных отложений составила 15 – 20 метров (Соколов, 1949).

Наиболее значимыми для формирования современной структуры территории исследования являются Московское и Валдайское оледенения. Датировки рознятся, но ряд ученых отмечает, что Московское оледенение покрывало Восточную Европу примерно 220 – 110 тыс. лет назад (Рельеф и стратиграфия ..., 1961; Марков и др., 1965; Чеботарева, Фаустова, 1982; Заррина, Краснов, 1989; Антонов и др., 2004; Величко и др., 2005). В среднем мощность отложений данного оледенения составила 20 – 40 м. На территории исследования сформировались хорошо выраженные конечные моренные гряды (бурые и красно-бурые суглинки), моренные равнины с камами и камовыми террасами, со следами озерных отложений, формировавшихся внутри тела ледника, а также флювиогляциальные отложения приледниковых озер и потоков талых ледниковых вод (Пузаченко и др., 2016). Таким образом, после московского оледенения остался характерный холмистый рельеф, который был сглажен в межледниковый и в Валдайский ледниковый период, который делился на 4 цикла похолодания и относительного потепления. Таким образом, холмистый рельеф московского времени претерпел эрозионное расчленение (Рельеф и стратиграфия ..., 1961; Последний европейский..., 1965; Заррина., Краснов, 1989; Москвитин, 1967, Чебатарева, 1961, 1973; Чеботарева, Макарычева, 1974) и стал увалистым. Ввиду сложности проведения границ распространения Валдайского оледенения из-за того, что ледник разбивался на лопасти и языки на границе своего распространения, существуют два различных мнения: первое – отложения Валдайского оледенения нет на территории исследования, второе – по низменностям и

речным долинам движением льда могло быть отдельными потоками (Пузаченко, Козлов, 2007) (Рисунок 2.5). Согласно полевым материалам коллектива ученых, работающих в Центрально-Лесном заповеднике, на территории исследования встречаются участки, где московская морена перекрыта маломощным валдайским моренным суглинком.

Таким образом, четвертичные чехол в пределах Центрально-Лесного заповедника представлен моренными и флювиогляциальными отложениями (Рисунок 2.4). Водно-ледниковые отложения представлены супесями, песками и песчано-глинистыми образованиями с редким включением погребенных торфов и почв. Моренные отложения на территории сильно отличаются по гранулометрическому и литологическому составу, они содержат 15 – 30 % илистой фракции, 30 – 40 % физической глины и 40-70 % фракции песка (Сороченков, 1937), а также включают в свой состав валуны, щебень и гравий. Морена преимущественно перекрыта покровными легкими и средними пылеватými суглинками (ср. мощность 60-70 см).

Рельеф территории представляет собой всхолмленный водораздел с преобладанием форм, сформировавшихся в результате оледенений, неоднократно развивавшихся в пределах территории заповедника с плиоцена (Рисунок 2.6). Так, территория исследования – это сочетание гряд и межгрядовых понижений. Для большей части территории характерно слабое расчленение поверхности (недостаточная степень дренированности) и небольшой уклон на северо-запад, абсолютная высота варьируют от 200 до 290 м. (Рисунок 2.6). Наибольшие отметки наблюдаются на юге заповедника, на гряде моренных холмов, а наименьшие на верховом болоте «Катин Мох» (Центрально-Лесной..., 2007).

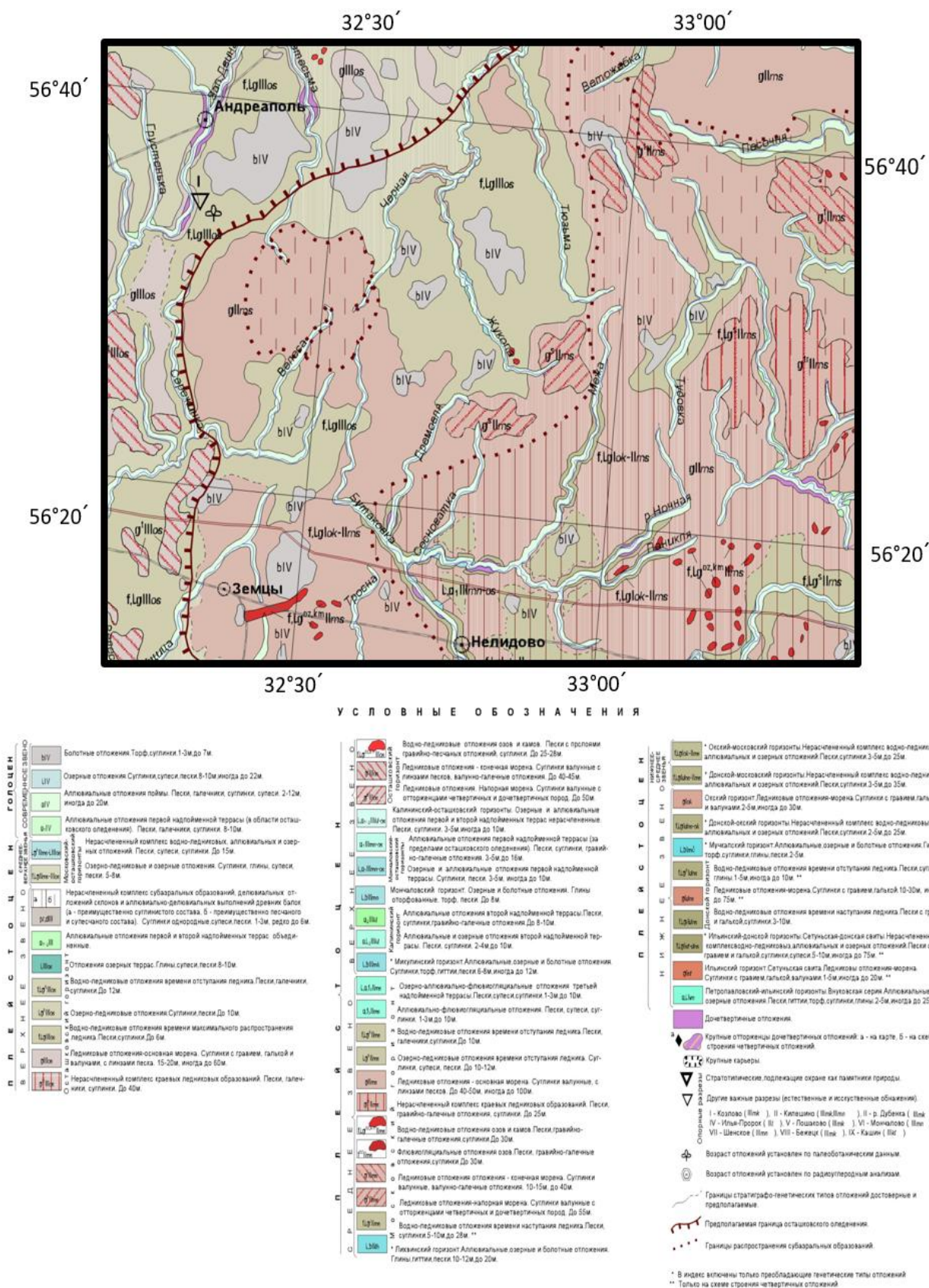


Рисунок 2.4 Фрагмент геологической карты четвертичных отложений
Тверской области (Составители: О.Н. Лаврович, И.П. Бирюков, З.К.
Барашкова)

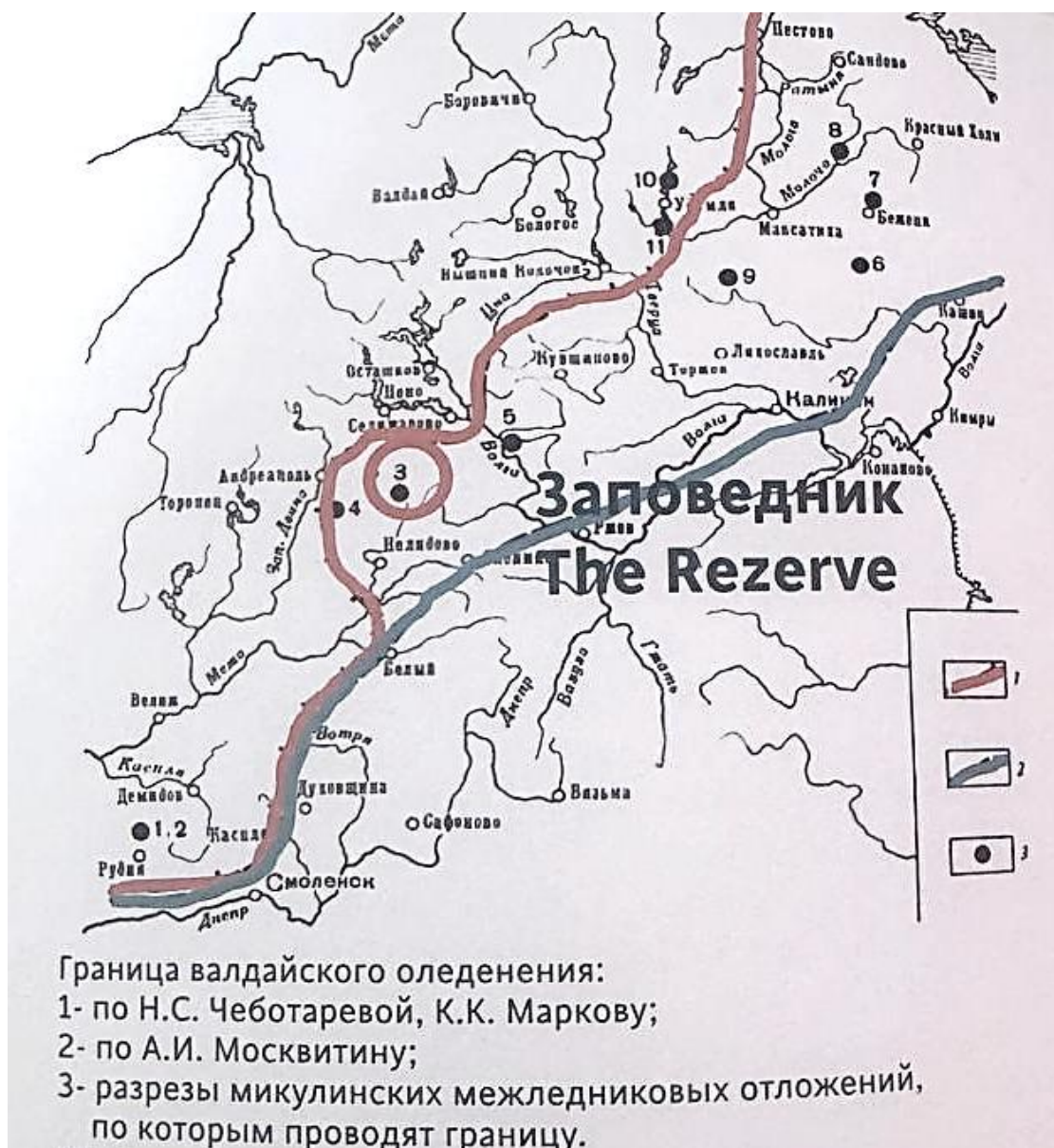


Рисунок 2.5 Представление о максимальной границе Валдайского оледенения в районе Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (Пузаченко и др., 2016)

Можно выделить несколько областей в зависимости от рельефа и особенностей геологического строения (Пузаченко, Козлов, 2007). Первая - совокупность гряд и холмов, вытянутых меридианально в центральной части территории исследования. Превышение над уровнем моря - 290 м, а относительная высота – 40 - 50 м. Восточнее располагается широкая (до 15 км в ширину) слабоволнистая равнина с абсолютной высотой 240 – 250 м. Вторая область - подковообразная гряда с шириной 5 км в узкой части и 9 км в наиболее широкой. Абсолютная высота неоднородна, она варьирует от 240 м

на западе и до 290 м на востоке. Гряда разбита на отдельные сектора, разделенные понижениями, дренированные реками, вытекающими из таких болот как Мухояровский и Демиховский Мох (Рисунок 2.7). К югу от гряды расположена пониженная хорошо дренированная равнина с абсолютными высотами 200 – 240 м. А к северу – плоская слабодренированная поверхность с высотой от 220 до 240 м. Ввиду отсутствия хорошо развитой дренирующей сети, здесь активно идет процесс заболачивая (Рисунок 2.6).

По мнению Ю.Г. Пузаченко и Д.Н. Козлова, подковообразная гряда, сложенная моренными суглинками с включением гравия и валунов с линзами песка, – конечная морена московского возраста, она маркирует край ледника, в то время как, расположенная с внутренней стороны равнина соответствует местоположению тела ледника (гляциодепрессия).

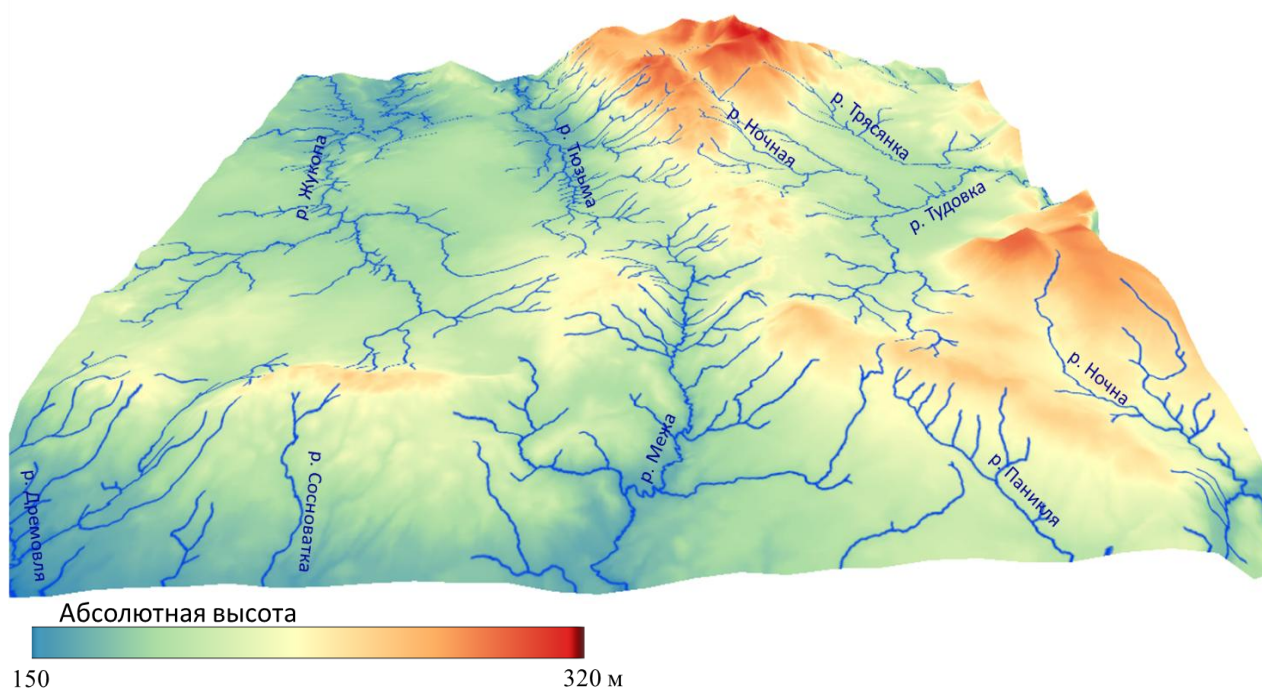


Рисунок 2.6 Цифровая модель рельефа с разрешением 30 метров

Согласно классификации рельефа территории на основе морфометрических характеристик на разных иерархических уровнях, выполненной Р.Б. Сандлерским, водно-ледниковые равнины занимают 33% территории, пологие склоны моренных гряд, озов, камов (4° - 8°) – 22%, очень пологие придолинные склоны – 17%, плоские привершинные поверхности

моренных гряд – 12,5%, очень пологие склоны моренных гряд, озов и камов ($2^{\circ} - 4^{\circ}$) – 7% и меньше всего занимают врезанные речные долины и выпуклые вершины моренных гряд (4,5%, 3,5% соответственно) (Сандлерский, 2013).

2.2 Поверхностные и грунтовые воды

Территория заповедника, как было сказано ранее, является водоразделом таких рек, как Волга и Западная Двина. Речная сеть состоит из рек, основными из которых являются р. Межа (бассейн Западной Двины), Жукопа, Тудовка, Тюзьма (бассейн Волги), а также из многочисленных речек и ручейков. (Рисунок 2.7). По оценкам на 1 км² приходится 0.75 км водотоков, для которых характерны ограниченные водосборы и слабая разработанность

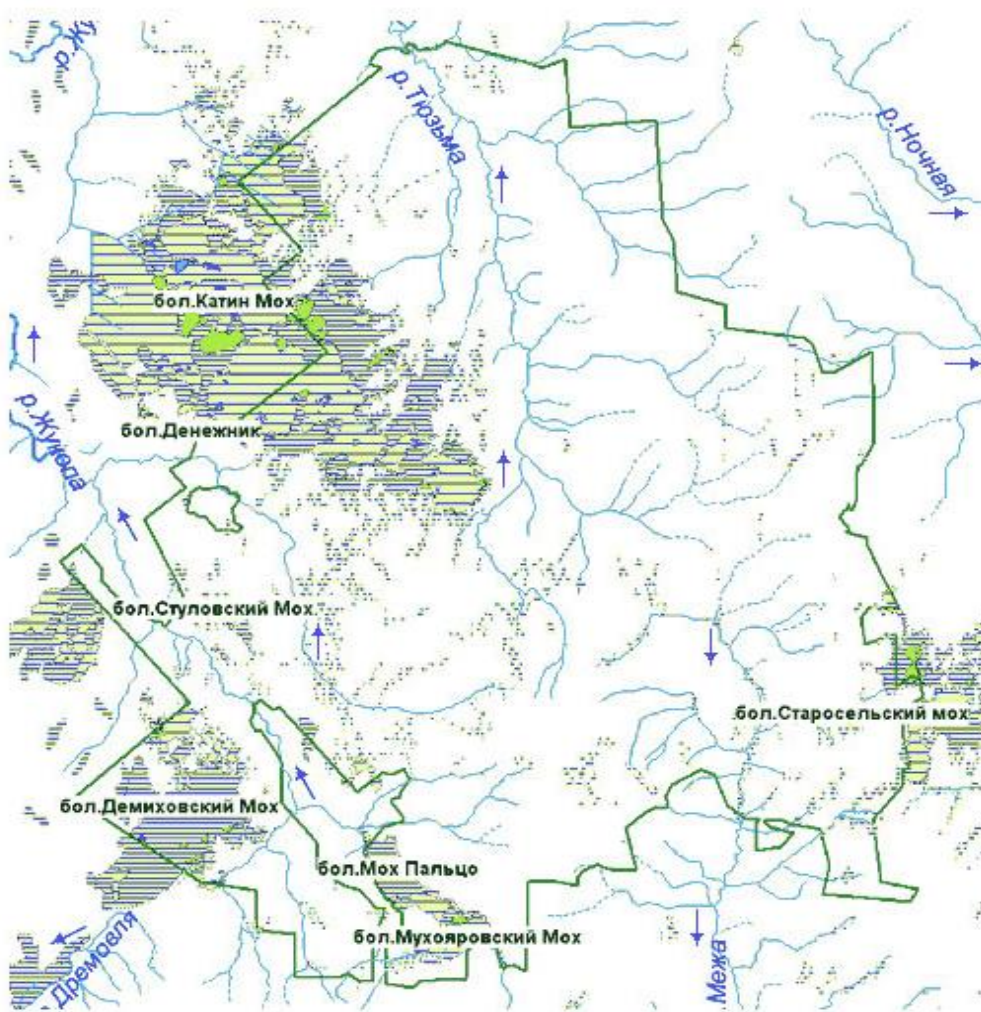


Рисунок 2.7 Гидрологическая сеть ЦЛГПБЗ

Источник: <http://www.clgz.ru>

долин (Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник: [сайт]. URL: <http://www.clgz.ru>).

Глубина грунтовых вод сильно зависит от погодных условий и положения в рельефе. В сухую и жаркую погоду уровень грунтовых вод (УГВ) может быть более 10 метров на хорошо дренированных участках. Однако, для большей части территории исследования характерно, что грунтовые воды залегают не незначительной глубине (в среднем 1,5 – 2 м при максимальной глубине 3-3,5 метров в сухую погоду). Из-за сложного многослойного строения четвертичной толщи можно выделить несколько горизонтов почвенно-грунтовых вод. При обильном выпадении осадков нередко образуется верховодка, приуроченная к покровным суглинкам и торфянистому горизонту. Ввиду слабой дренированности поверхности, активно проходит процесс заболачивания, здесь развиваются огромные верховые болота. Наибольшими по площади являются болота: Катин Мох (3970 га), Демидовский Мох (936 га) и Верховской Мох (800 га), Старосельский мох (617 га) и т.д. (Рисунок 2.7).

2.3 Климат

Согласно схемам климатического районирования, территория заповедника расположена на стыке восточноевропейского и западноевропейского районов атлантико-континентальной области умеренного климата с интенсивной циркуляцией (Рисунок 2.8) и хорошо выраженным циклом сезонных изменений (Мячкова, 1983; Ольчев и др., 2017).

Отличительной особенностью климата лесной зоны Русской равнины - сильная изменчивость погодных условий, являющаяся результатом соприкосновения воздушных масс разного генезиса (Мячкова, 1983). Особое влияние имеют воздушные массы с Атлантики (западный перенос), оказывающие тепляющее воздействие зимой и охлаждающее в летние месяцы (прохладная и дождливая погода), но периодически можно наблюдать

адвекции арктического воздуха. В зимние месяцы большой вклад в

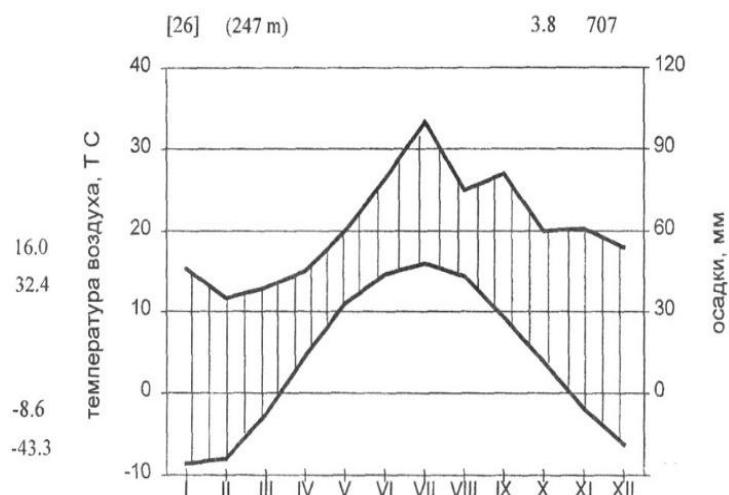


Рисунок 2.8 Климатограмма
среднемноголетнего соотношения осадков и
температуры (Нижняя линия – температура
воздуха, верхняя- количество осадков)

Источник: <http://www.clgz.ru>

формирование климата территории вносит рельеф, отмечается, что Валдайская возвышенность характеризуется повышенным количеством осадков. В холодное время года на территорию исследования с запада и юго-запада проникают циклоны. Средиземноморские циклоны оказывают отопляющее воздействие и способствуют

наступлению оттепелей. В условиях антициклональной деятельности холодные воздушные массы перемещаются с северо-востока на юго-запад и с северо-запада на юго-восток. Для весны характерно интенсивное увеличение температуры, что приводит к быстрому снеготаянию и поверхностному стоку талых вод. Также в весенние месяцы преобладает безоблачная погода и ветра юго-восточного направления. В летние месяцы наблюдается почти в 2 раза меньше циклональной деятельности, чем зимой, часто распространяется отрог Азорского антициклона. Несмотря на относительно стабильность погоды летом, в конце мая – начале июня и в конце августа могут быть ночные заморозки.

В среднем с 1963 по 2020 год количество безморозных дней составило 194 дня, хотя данный показатель сильно варьирует из года в год (минимум – 92 дня). Дней без оттепели – 71, 123 дня со снежным покровом (Летопись природы..., 2022). Устойчивый снежный покров образуется во второй половине ноября и разрушается в середине апреля. Однако, в последнее время можно наблюдать более раннее снеготаяние. Мощность снежного покрова

сильно варьирует в зависимости от температур и количества осадков конкретного года, максимум составляет 60 см, а, например, фенологической зимой 2020 года устойчивый снежный покров не образовывался ввиду частых оттепелей (средняя мощность составила всего 5 см (Летопись природы..., 2020)).

Климатические условия территории исследования характеризуются данными двух метеорологических станций. Первая расположена непосредственно в охраняемой зоне заповедника (Федоровское), а вторая с более длинным рядом данных (Вышний Волочек) удалена на 100-120 км к северо-востоку и расположена на 20-30 метров ниже по гипсометрическому уровню. Также на территории заповедника осуществляются наблюдения за микроклиматом на метеопосте «Лесной заповедник», расположенном в ельнике-кисличнике, в 350 метрах на север от поселка Заповедный.

Осадки. В среднем для территории исследования 196 дней в году выпадают осадки (135 дней – с дождем, 97 – со снегом). Обобщив данные с 1963 по 2023 год с метеопоста «Лесной заповедник», можно сделать вывод, что среднее количество осадков за последние 60 лет составило 764 мм, а медианное значение – 744 мм (Рисунок 2.9б). Аномально сухими были 1963 г (518,4 мм), 1964 г (523,7 мм), 1972 (556,8 мм), 2002 (509,3 мм) а наиболее влажными являются 1990 (951,2 мм), 2012 (1050 мм), 2017 (954,6 мм), 2020 (992,2 мм), 2023 (1006,3 мм).

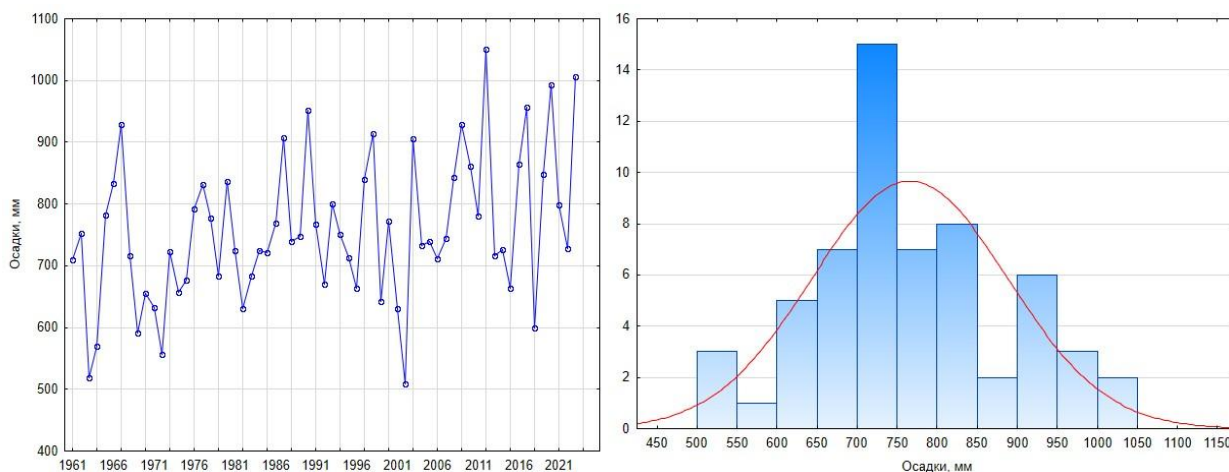


Рисунок 2.9 а) Количество осадков с 1963 по 2023 год (по данным метеопоста «Лесной заповедник» б) Гистограмма распределения осадков.

Примечание: данные за 1969 и 1970 год утеряны, но по данным метеостанции в Торопце эти годы были относительно сухие (590 и 656 мм соответственно)

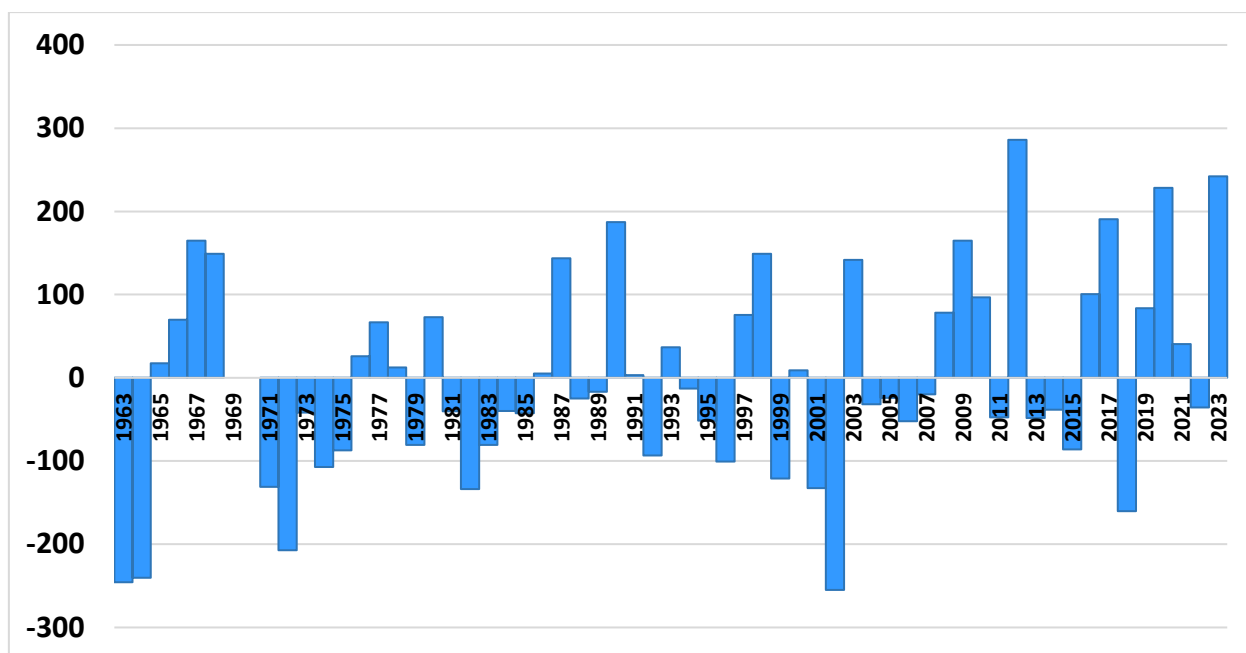


Рисунок 2.10 Осадки. Отклонение от среднего значения за последние 60 лет

Согласно рисунку 2.10, можно констатировать, что на территории исследования за последние 60 лет было больше сроков с количеством осадков меньше среднемноголетнего значения (в 54 % случаев). Можно выделить периоды, когда несколько лет подряд были аномально сухими: 1971 – 1975 гг. (данные за 1969 и 1970 год утеряны, однако на метеостанции в Вышнем Волочке зафиксировано, что годы были сухими), 1981-1985 гг., 2004 – 2007 гг. Влажные периоды: 1965 – 1968 гг., 2008 – 2010 гг., 2019 – 2021 гг.

На рисунке 2.11 показано что, коэффициент корреляции нигде не выходит за пределы доверительного интервала. Следовательно, можно утверждать, что за 60 лет результаты наблюдений носят случайный характер, колебания количества осадков не выходили за пределы «белого шума». Таким образом, статистически достоверного тренда изменения количества осадков на территории Центрально-Лесного заповедника не было зафиксировано. Однако, в работе (Зорина, Шуйская, 2020) показано, что есть тренды в количестве осадков отдельных месяцев: уменьшение в сентябре, увеличение в ноябре, декабре.

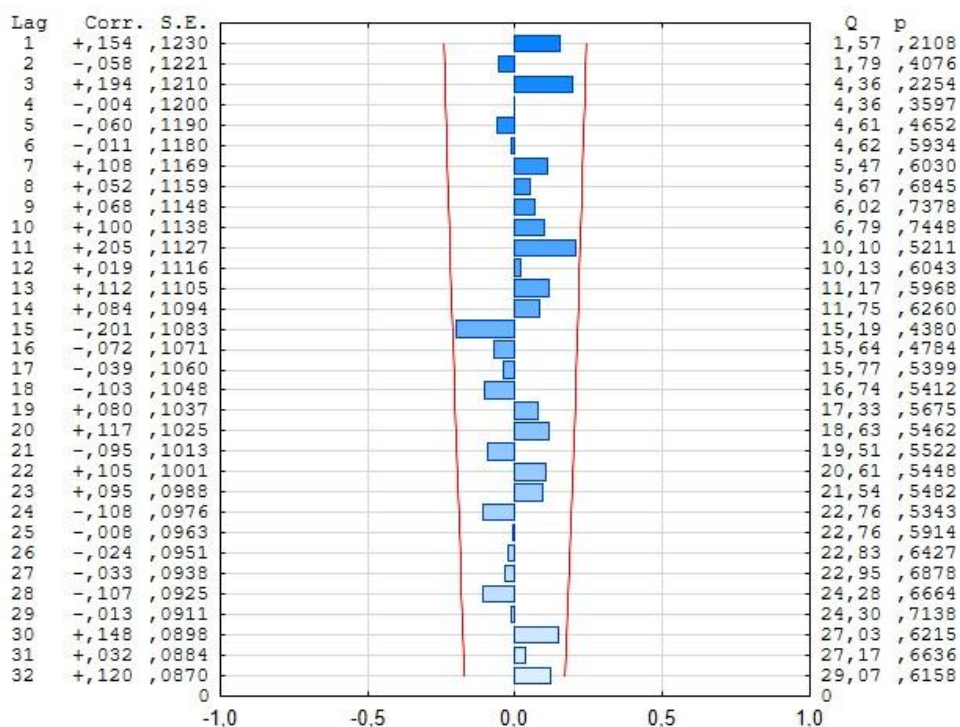


Рисунок 2.11 Автокорреляционная функция для ряда значений среднегодового количества осадков (по данным метеопоста «Лесной заповедник»). Красные линии – доверительный интервал 95%. Сдвиг соответствует половине длины ряда

Температура. Согласно данным с метеостанции «Лесной заповедник» с 1963 по 2023 год средняя многолетняя годовая температура воздуха на территории заповедника составляет $4,5^{\circ}\text{C}$. Самыми теплыми годами были 1989 (6°C), 2005 ($5,8^{\circ}\text{C}$), 2015 ($5,9^{\circ}\text{C}$), 2019 (6°C), 2020 ($6,7^{\circ}\text{C}$), а самыми холодными – 1987 ($1,9^{\circ}\text{C}$), 1978 ($2,4^{\circ}\text{C}$), 1985, 1980 ($2,6^{\circ}\text{C}$) (Рисунок 2.12).

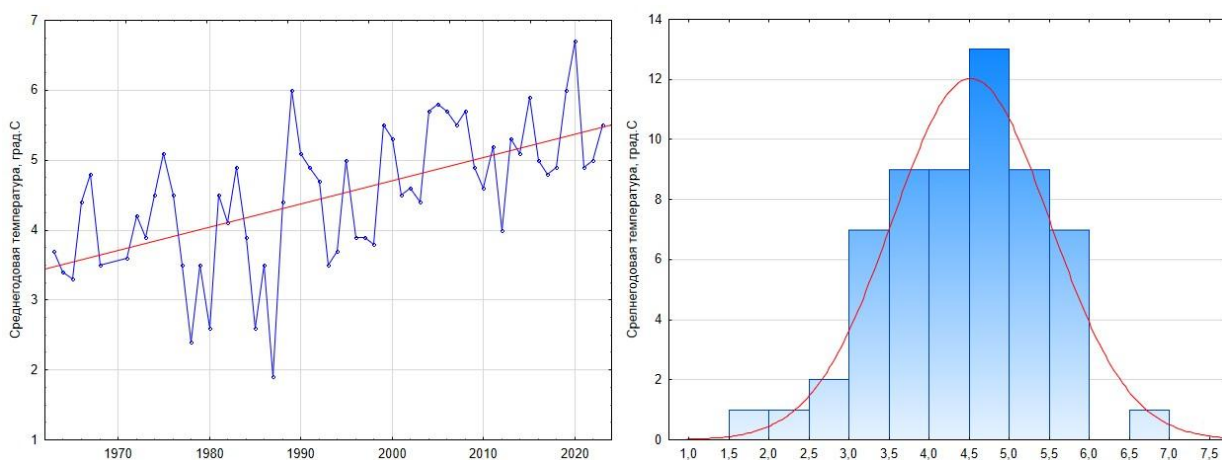


Рисунок 2.12 а) Среднегодовая температура воздуха б) Гистограмма распределения среднегодовой температуры воздуха

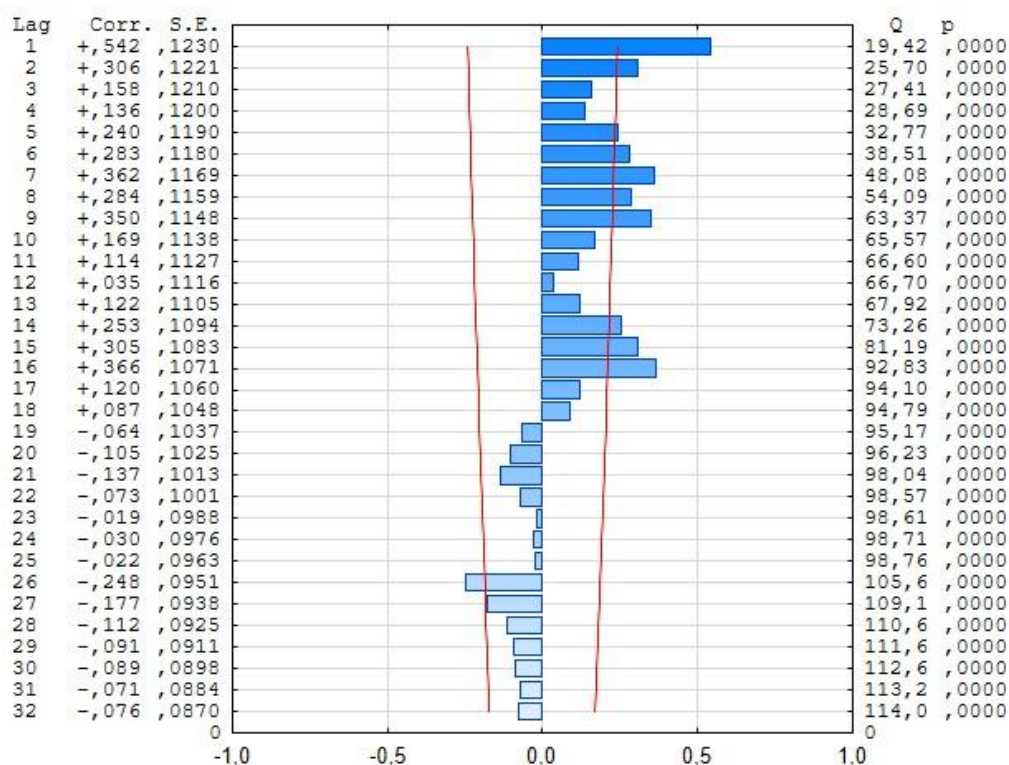


Рисунок 2.13 Автокорреляционная функция для ряда значений среднегодовой температуры воздуха (по данным метеопоста «Лесной заповедник»). Красные линии – доверительный интервал 95%. Сдвиг соответствует половине длины ряда

Автокорреляция показала наличие статистически достоверного тренда увеличения среднегодовой температуры воздуха (Рисунок 2.13). Периодограмма ряда наблюдений выделяет периоды около 8 и 5 лет, а также на слабом уровне достоверности 15-16 лет (Рисунок 2.14)

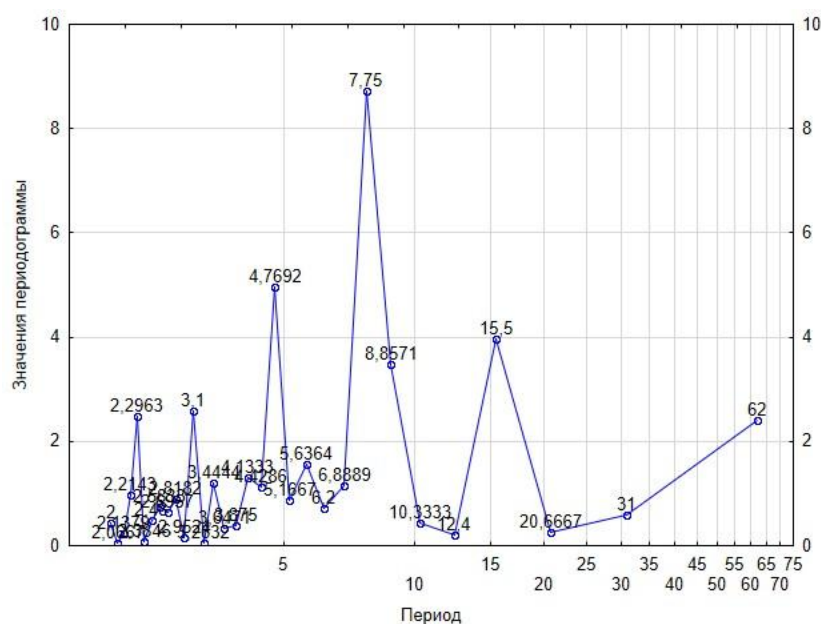


Рисунок 2.14 Периодограмма для ряда среднегодовых температур воздуха

Средняя температура самого теплого месяца составила $16,9^{\circ}\text{C}$. Лета с повышенным количеством тепла были в 2001 (июль= $20,9^{\circ}\text{C}$), 2010 (июль= $20,3^{\circ}\text{C}$), 2011(июль= $20,3^{\circ}\text{C}$), 2005 (июль= $19,7^{\circ}\text{C}$), 1963, 1972, 2002 (июль= $19,5^{\circ}\text{C}$) и с пониженным в 1979 (июль= $13,6^{\circ}\text{C}$), 2019 (июль= $14,1^{\circ}\text{C}$), 1978, 1990 (июль= $14,4^{\circ}\text{C}$), 1987 (июль= $14,6^{\circ}\text{C}$), 1984, 1985 (июль= $14,8^{\circ}\text{C}$), 1976 (июль= $14,9^{\circ}\text{C}$) (Рисунок 2.15а,б).

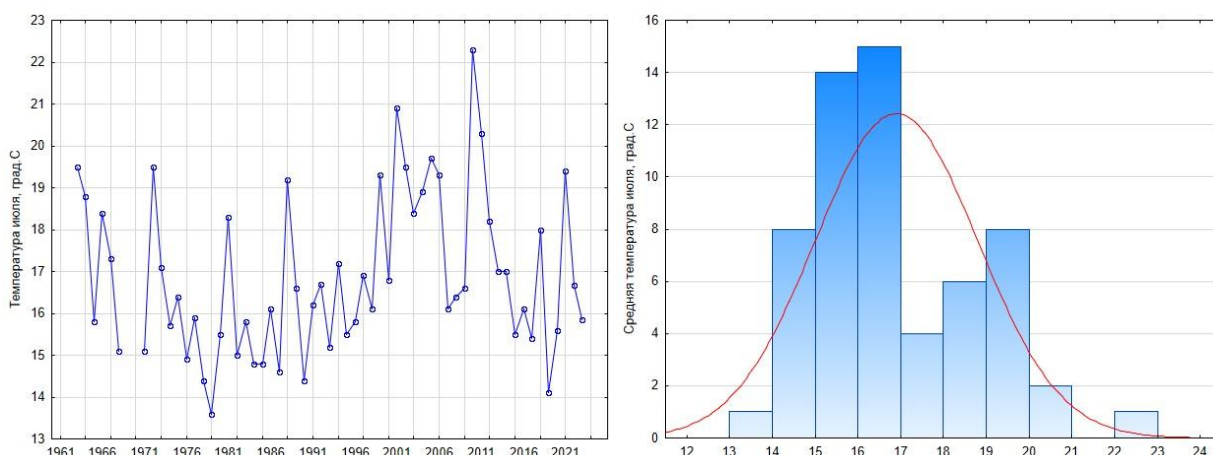


Рисунок 2.15 а) Средняя температура июля б) Гистограмма распределения средней температуры июля

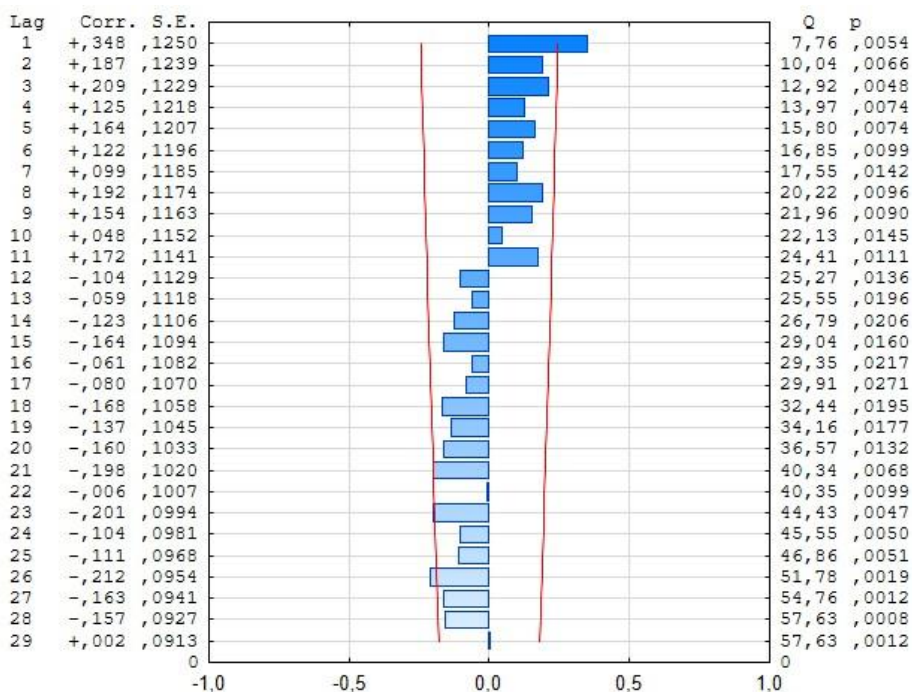


Рисунок 2.16 Автокорреляционная функция для ряда значений температуры воздуха в июле месяце (по данным метеопоста «Лесной заповедник»). Красные линии – доверительный интервал 95%. Сдвиг соответствует половине длины ряда

Согласно рисунку 2.16 коэффициент корреляции достоверен на 1, 21, 23, 26 шаге. В целом, его значения линейно уменьшается по мере увеличения шага сдвига ряда относительно самого себя до 26 лет. Это показывает наличие тренда. Анализ периодограммы показывает существование периода около 3 и 10(11) лет (Рисунок 2.17).

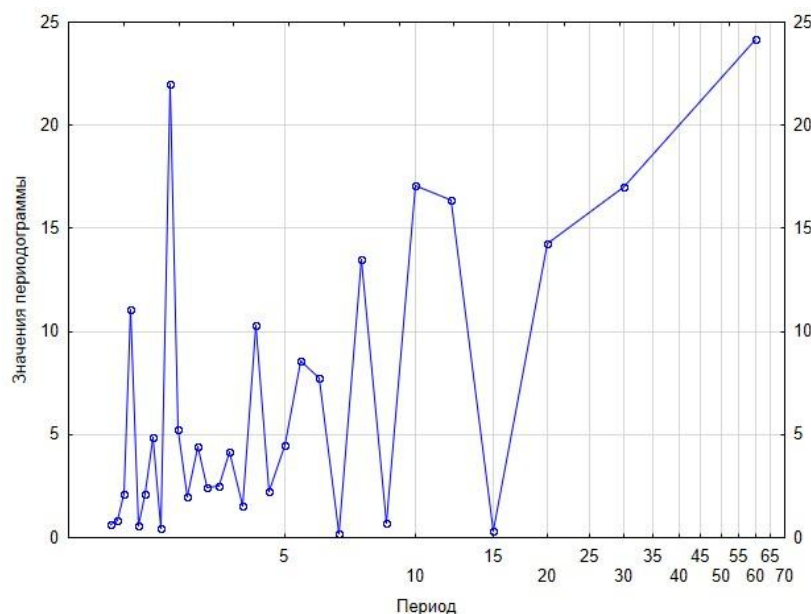


Рисунок 2.17 Периодограмма для ряда температур воздуха июля

Средняя температура самого холодного месяца составляет $-8,1^{\circ}\text{C}$. Самые морозные зимы зафиксированы в 1987 (января= $-18,9^{\circ}\text{C}$), 1968 (января= $-16,9^{\circ}\text{C}$) 1972 (января= $-16,5^{\circ}\text{C}$), 1963 (января= $-15,4^{\circ}\text{C}$), 2010 (января= $-15,3^{\circ}\text{C}$), а самые теплые были в 2020 (января= $-0,2^{\circ}\text{C}$), 1989 (января= $-2,1^{\circ}\text{C}$), 2007 (января= $-2,7^{\circ}\text{C}$), 2005 (января= $-3,1^{\circ}\text{C}$) (Рисунок 2.18а,б).

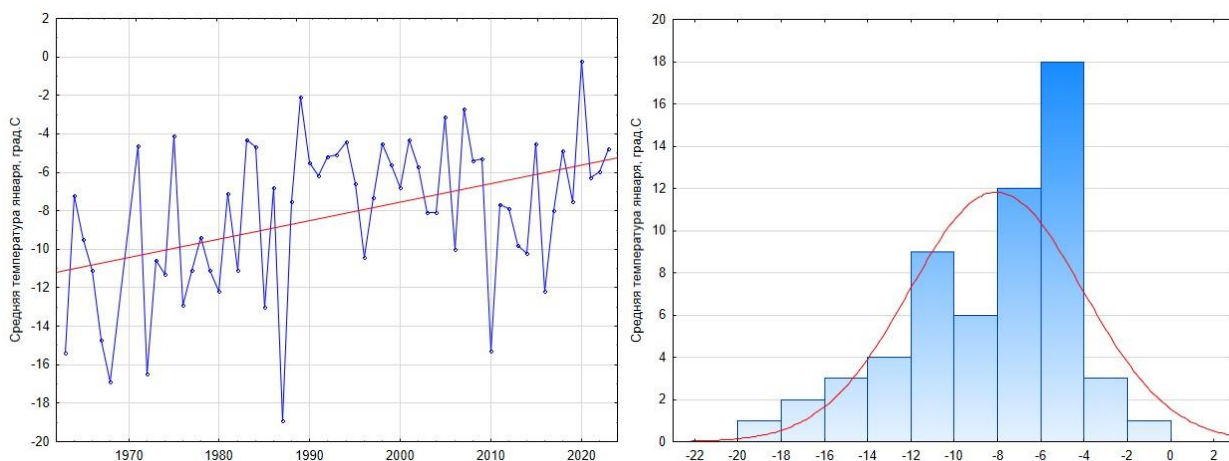


Рисунок 2.18 а) Средняя температура января б) Гистограмма распределения средней температуры января

Анализ автокорреляции ряда данных средних температур за январь месяц показывает отсутствия тренда (Рисунок 2.19).

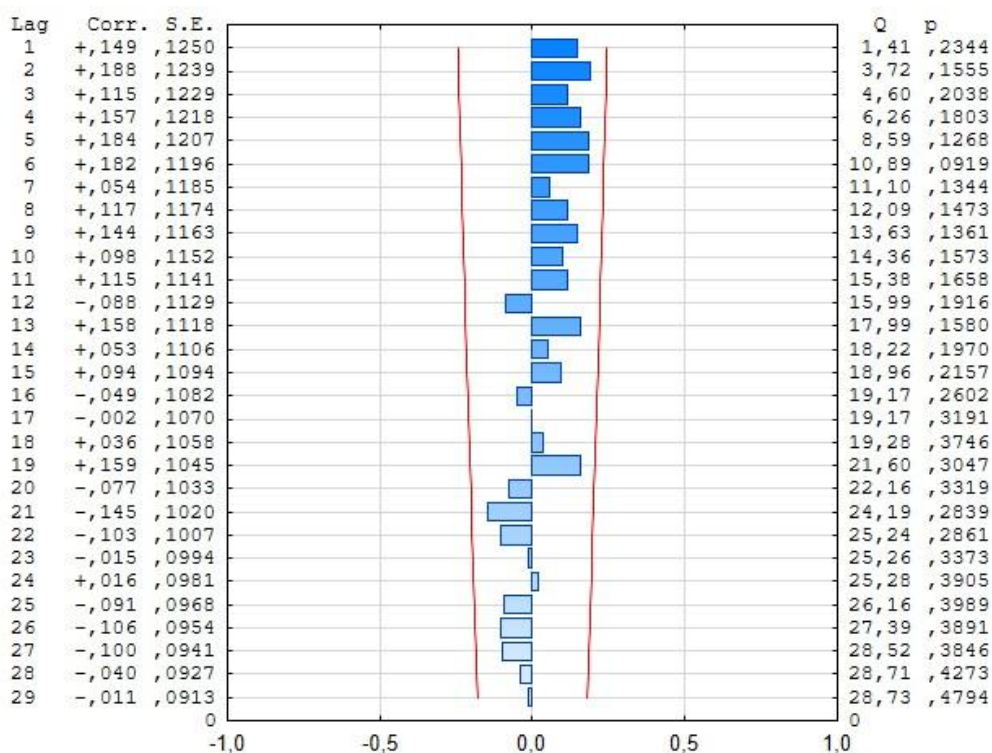


Рисунок 2.19 Автокорреляционная функция для ряда значений температуры воздуха в январе месяце (по данным метеопоста «Лесной заповедник»). Красные линии – доверительный интервал 95%. Сдвиг соответствует половине длины ряда

Однако, по данным Е. Шуйской, на территории исследования зимы становятся менее продолжительными и более теплыми за счет увеличения средних температур воздуха в декабре месяце (Шуйская, 2021).

В целом для территории заповедника отмечается незначительное межгодовое варьирование годовой и средней месячной июльской температуры ($\pm 3-5^{\circ}\text{C}$), а январские температуры сильно изменяют от года в год ($\pm 10-15^{\circ}\text{C}$) (Рисунок 2.12а, 2.15а, 2.18а) (Летопись природы..., 2010).

Для выявления аномальной жаркой или холодной погоды были проанализированы временные ряды максимальной и минимальной температуры за последние 60 лет. Максимальная температура составила $37,1^{\circ}\text{C}$ в 2010 году, а минимальная – $(-39,4^{\circ}\text{C})$ в 1979 году. Согласно графику

2.20а, мы наблюдаем почти линейный тренд увеличения максимальных температур, в первую очередь за временной интервал с 1971 по 2008 год, далее рост наблюдается за счет двух аномальных годов (2010 и 2013), с 2014 по 2022 год показатель выходит на плато. Иная ситуация для минимальных температур, для которых характерна квадратичная зависимость от времени. С 1963 по 1978 наблюдается тренд уменьшения температур, с 1979 по 2006 – относительно стабильно, с 2007 по 2023 – увеличение температуры, зимы становятся теплее, без резких заморозков.

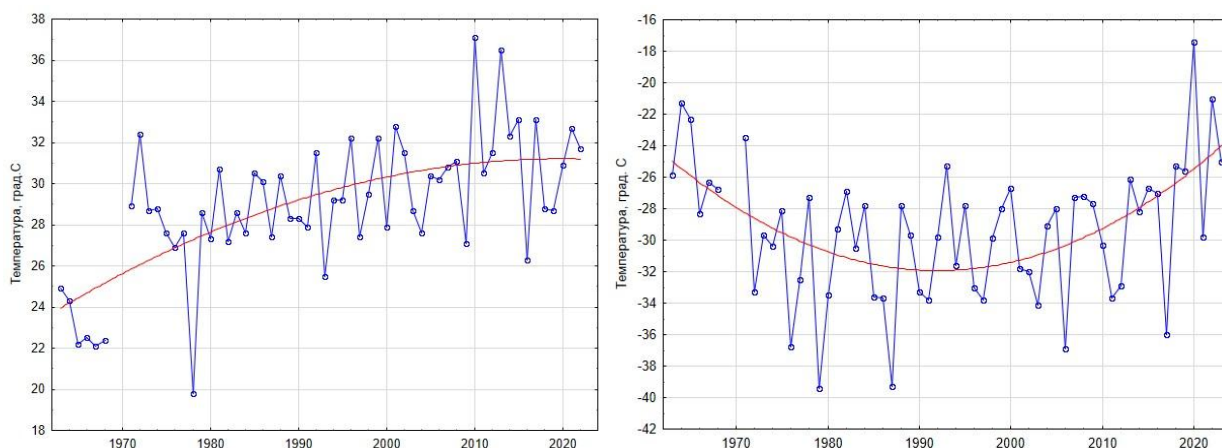


Рисунок 2.20 а) Максимальная и б) минимальная температура воздуха

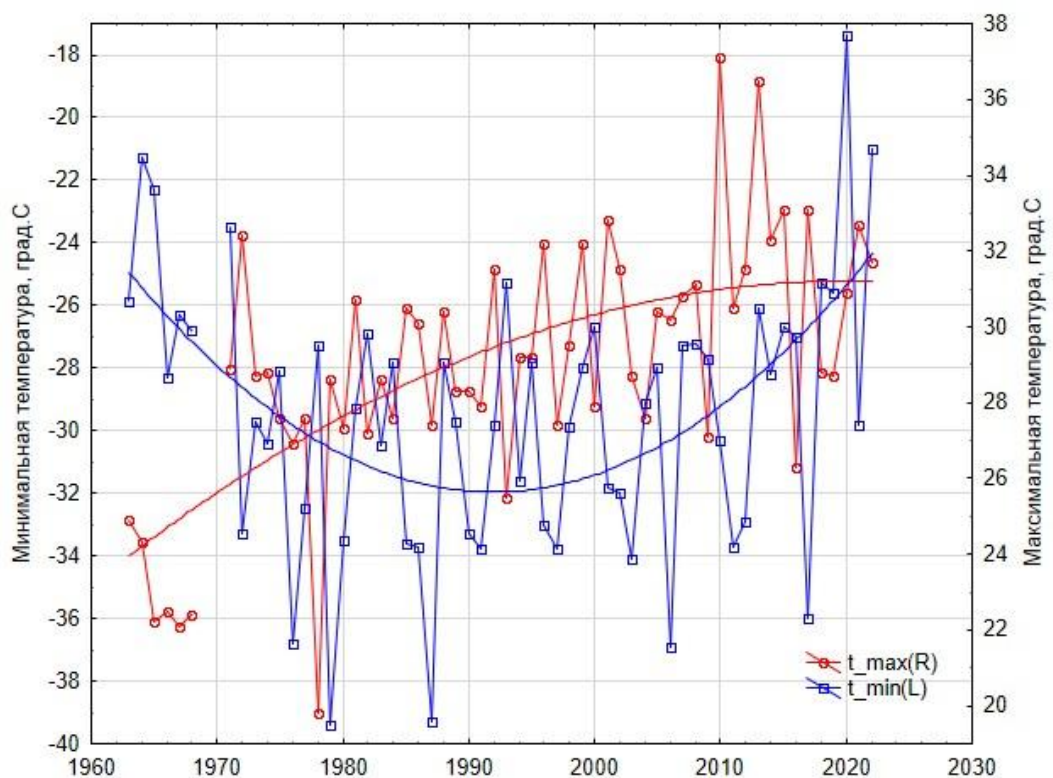


Рисунок 2.21 Максимальная и минимальная температура воздуха

Если совместно рассматривать графики максимальных и минимальных температур, то можно проследить закон компенсации, аномально холодной зиме соответствуют жаркое лето и наоборот (Рисунок 2.21).

Соотношение тепла и влаги.

В целом, для территории исследования сумма осадков превышает суммарное испарение. Среднее значение гидротермического коэффициента Селянинова с 1963 по 2023 год составило 1,647, что является оптимальным для еловых лесов. Согласно рисунку 2.22 в 1992 и 2002 году значения коэффициента были менее 0,8, что соответствует условиям степи, так же засушливыми были 1963, 1964, 1966, 2018 годы (значения от 0,8 до 1, характерные для лесостепи). Соотношение тепла и влаги как для лиственных лесов были в 1971, 1972, 1981, 2001, 2015, 2022 годах. Показатели гидротермического индекса, характерные для оптимума еловых лесов были в 1967, 1968, 1973 – 1976, 1978, 1979, 1982, 1983, 1985, 1986, 1989, 1994 – 1997, 2004, 2005, 2007, 2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2021 годах. Шесть сроков наблюдения соответствуют условиям северной тайги 1965, 1988, 1993, 2009, 2012, 2023. Гидротермический коэффициент Селянинова больше 2 (условия переувлажнения были в 1977, 1980, 1984, 1990, 1991, 1998, 2000, 2003, 2006, 2008, 2017, 2019, 2020 годы. Особенно мокрым был 1987 год, значения коэффициента достигли отметки в 3,2.

Если рассматривать соотношение тепла и влаги за последние 60 лет, то оптимальные условия для произрастания еловых лесов были 45% сроков наблюдения, на засушливые годы приходится 21%, на годы с переувлажнением 34%.

Итак, согласно рисунку 2.12, наблюдётся тенденция увеличения среднегодовой температуры воздуха с 1963 по 2023 год. Рост среднегодовой температуры обусловлен увеличением показателей для июля, августа,

сентября и декабря, а незначительное изменение осадков в первую очередь

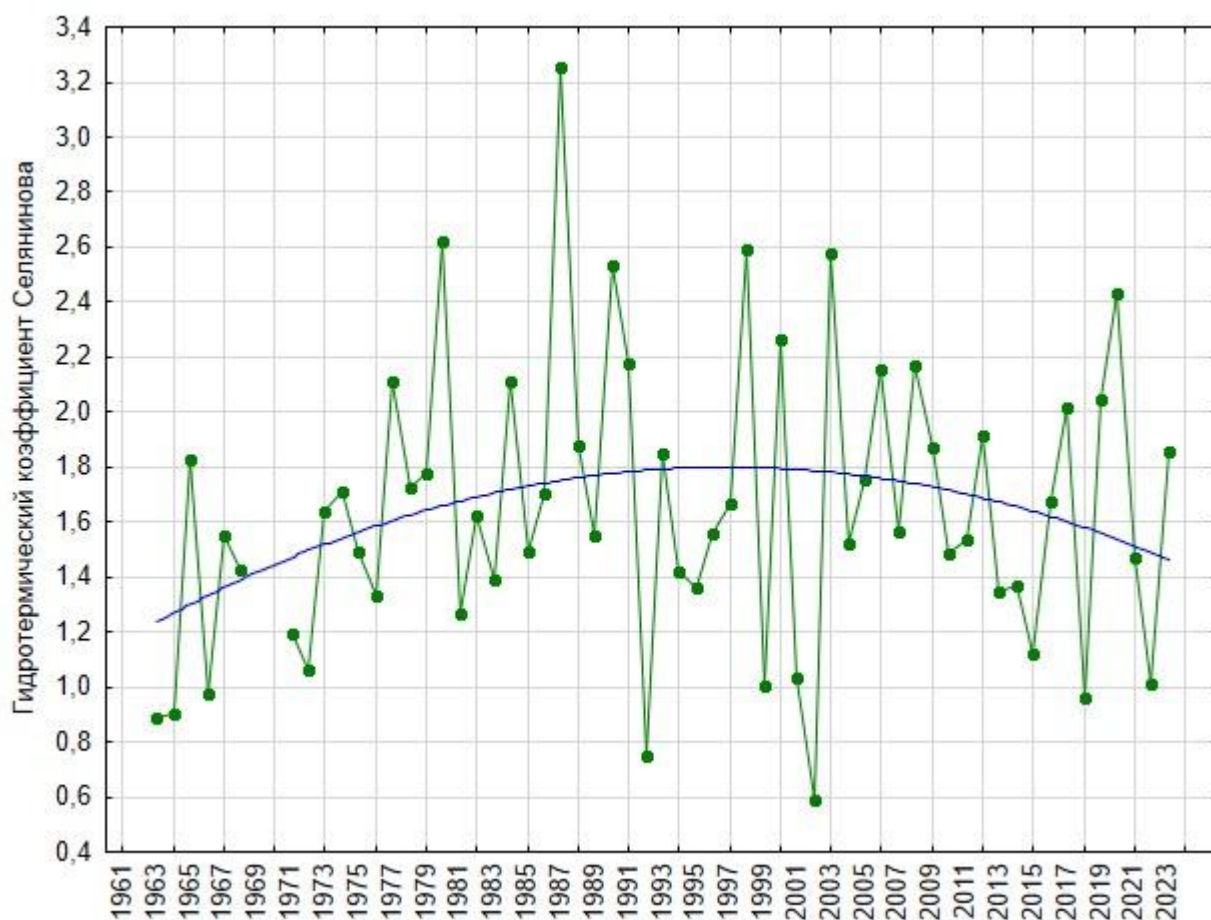


Рисунок 2.22 Многолетняя динамика показателей гидротермического коэффициента Селянинова (по данным метеопоста «Лесной заповедник» с 1963 по 2023 год)

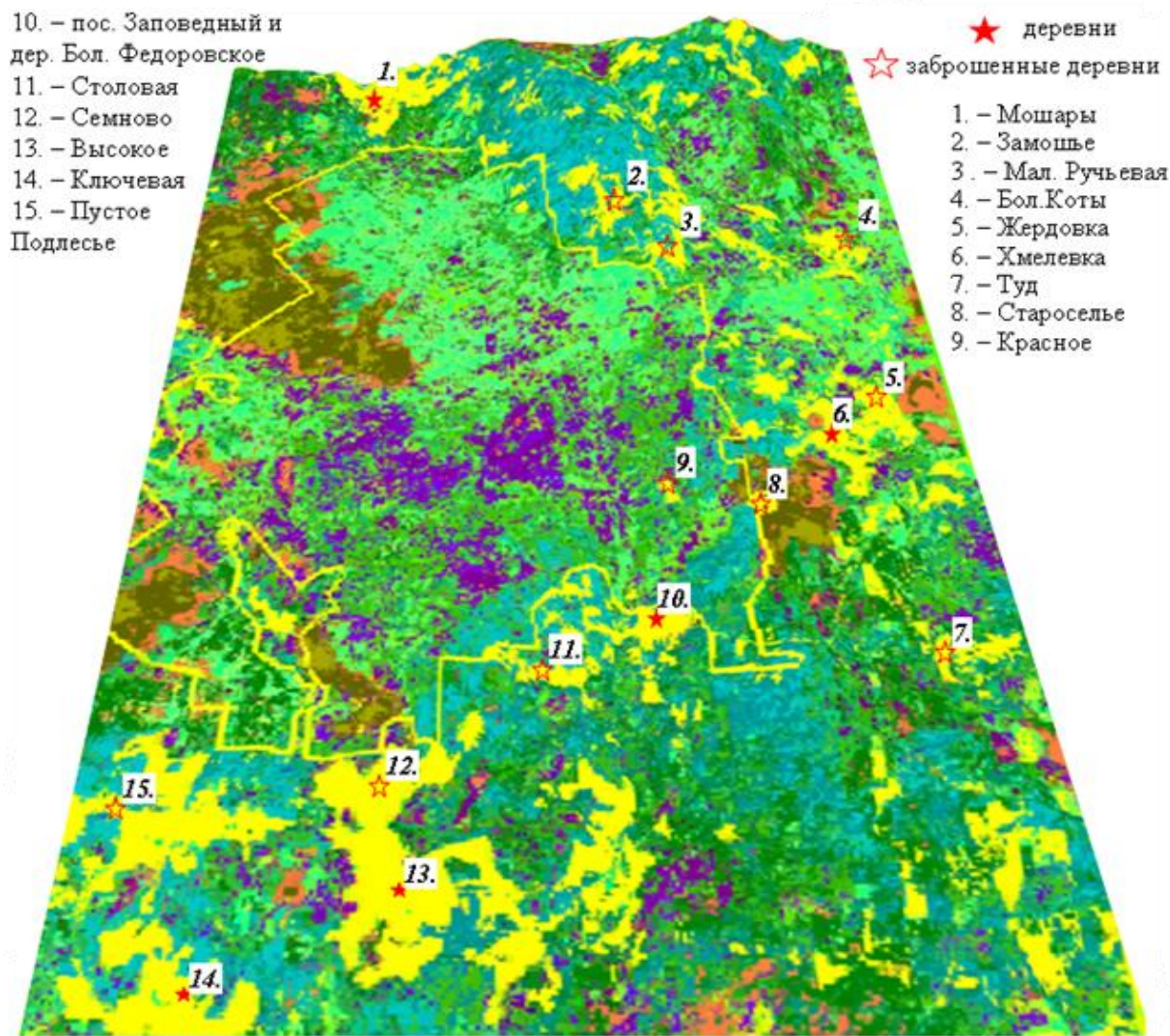
связано с увеличением их в ноябре и декабре (Зорина и др., 2020). Таким образом, мы наблюдаем сдвиги фенологических фаз у растений и животных ввиду изменения климата (в первую очередь, уменьшение сроков зимы). Зорина с коллегами проанализировала фенологические изменения для 11 сосудистых растений на территории Центрально-Лесного заповедника и установили, что у 10 из 11 видов наблюдается тренд более раннего наступления событий, например, статистически достоверен тренд раннего цветения у ветреницы дубравной (*Anemone nemorosa*). Данные изменения характерны и для животного мира, например, более раннее появление ящерицы живородящей, лягушки травяной, первая встреча бабочки-крапивницы и т.д. (Зорина, Шуйская, 2020).

По мнению Ю.Г. Пузаченко, мы можем наблюдать 50-летнюю составляющую колебания осадков и температуры (Пузаченко, 2012). Более теплая и влажная погода способствует увеличению широколиственных видов таких, как клен, вяз, липа, лещина на моренных грядках и широкому распространению сфагнома на плоских и вогнутых формах рельефа. Таким образом, климат движется в направлении атлантического периода (Пузаченко, 2012).

2.4 Растительный покров

Согласно ботанико-географическому районированию территория принадлежит зоне хвойно-широколиственных лесов Русской равнины (Семенова-Тян-Шанская, Сочава, 1956; Огуреева, 1999), по Шенникову и Васильеву – к полосе дубраво-кустарничковых лесов Восточно-Европейской геоботанической провинции (1973). Но ввиду особенностей рельефа, климата, почвообразующих пород на большей части территории (около 43-45% от общей площади ядра заповедника) расположены старовозрастные нетронутые рубками южно-таежные еловые леса (Рисунок 2.23) (Карпов, 1973). Только во времена закрытия заповедника (с 1951 по 1960 г.) на территории южного лесничества производились небольшие сплошные рубки. В охранной же зоне ЦЛГЗ во второй половине XX века были промышленные вырубки, уничтожившие уникальные леса. Ельники представлены преимущественно *Picea abies* (L.) Karst и гибридной формой *Picea fennica*. Меньшие площади заняты зональными хвойно-широколиственными лесами в сочетании с участками широколиственных лесов. На втором месте по занимаемой площади расположены вторичные березняки и осинники, возникшие после массовых вывалов и пожаров (около 40% территории) (Рисунок 2.23), остальную территорию занимают заболоченные сосняки (10% площади заповедника), около 6% приходится на верховые болота Катин Мох, Демидовский Мох, Старосельский Мох и Верховской Мох, а наименьшую площадь занимают черноольховые леса, приуроченные к долине рек (Миняев,

1976). В таблице 2.1 приведены соотношения площадей основных типов леса на территории Центрально-Лесного заповедника по современным оценкам на основе дистанционных данных.



Типы растительности

NN	Тип	Древостой	Характерные виды травяного	ОПН, %	
				Трава	Мох
1	Зарастающие луга и пашни	4 Ол. С 3Б 1Е 1О с 1И	<i>U. dioica</i> , <i>D. serotina</i> , <i>Ranunculus</i> sp., <i>A. subrotundus</i>	65	4
2	Верховые болота	нет	<i>B. vaginatum</i> , <i>M. trifidum</i> , <i>O. phaeus</i>	31	91
3		8Б 2С +Е	<i>A. polytrichum</i> , <i>Carex</i> sp., <i>B. agrum</i> , <i>M. phaeus</i> , <i>B. vaginatum</i>	40	90
4	Ельники леса	10Е +Б +О с	<i>V. myrtillus</i> , <i>L. borealis</i> , <i>V. uliginosum</i> , <i>O. acetosella</i>	35	73
5		9Е 1Б +О с +О п +Р	<i>V. myrtillus</i> , <i>L. borealis</i> , <i>D. diluviana</i> , <i>O. acetosella</i> , <i>D. cerastium</i>	39	44
6	Ельники сосновых леса	6Е 3Б 1С	<i>B. vaginatum</i> , <i>V. uliginosum</i> , <i>V. myrtillus</i> , <i>M. phaeus</i>	31	59
7		6Е 2Б 1О с 0.50 п с 0.5 Р	<i>V. myrtillus</i> , <i>D. diluviana</i> , <i>B. agrum</i> , <i>S. ulmaria</i> , <i>C. arundinacea</i>	33	46
8	Мелко-пестролистный лес	5Е 2Б 1О с 0.50 п с 0.5 Р 0.5 О п с +Б	<i>O. acetosella</i> , <i>D. diluviana</i> , <i>V. myrtillus</i> , <i>A. subrotundus</i>	42	14
9		4Е 3Б 1О п с 0.50 с 0.5 п 0.5 К 0.5Б +Р	<i>A. subrotundus</i> , <i>M. phaeus</i> , <i>L. borealis</i> , <i>S. ulmaria</i> , <i>A. subrotundus</i>	51	11
10		4Е 2Б 1О с 1О п с 0.50 п с 0.5Б 0.5К 0.5И +Р +Я	<i>F. ulmaria</i> , <i>F. vesca</i> , <i>M. phaeus</i> , <i>G. rubra</i> , <i>G. lucida</i> , <i>P. obscura</i>	56	8
11		3Е 2Б 1О с 1О п с 1И 1К 1Б +Р	<i>A. nemorosus</i> , <i>D. diluviana</i> , <i>O. acetosella</i> , <i>G. lucida</i> , <i>M. phaeus</i>	48	6
12	Широколиственный лес	3Е 3Б 3О с 1И +Р	<i>S. holostea</i> , <i>S. nemorosus</i> , <i>V. myrtillus</i>	51	10
13		6Л 1К 1О с 1Б 1Е	<i>Carex</i> sp., <i>L. vernus</i> , <i>C. arundinacea</i> , <i>A. septentrionalis</i>	83	0
14		5Е 2Б 2О с 1Р +К	<i>M. phaeus</i> , <i>A. filix-ferre</i> , <i>O. acetosella</i> , <i>S. holostea</i> , <i>S. nemorosus</i>	30	19
15		4Е 2Б 1О с 1О п с 1Р 0.5К 0.5И +И +Б	<i>F. ulmaria</i> , <i>D. diluviana</i> , <i>A. filix-ferre</i> , <i>F. rubra</i> , <i>S. holostea</i> , <i>D. cerastium</i>	37	16

Рисунок 2.23 Картосхема растительности исследуемой территории составленная с использованием полевых материалов, наложенная на трехмерную модель рельефа, разрешение 30 х 30 м (по Сандлерскому, 2013)

Таблица 2.1 Соотношение площадей различных типов леса, га (в границах 2023 года)

	Ядро	Охранная зона
Болота	1130,40	1954,26
Молодые сосняки по болоту	970,92	1632,96
Сосняки и елово-сосновые леса	1172,70	1729,35
Ельники неморальные	4702,77	7139,34
Ельники бореальные	12959,46	16358,31
Мелколиственные и елово-мелколиственные леса	2099,07	9485,91
Елово-мелколиственно-широколиственные леса	1360,8	7396,29
Луга	21,42	581,76
Селитьба	3,24	200,79

Динамика растительного покрова с 1987 по 2022 год.

К основным факторам динамики растительного покрова за последние 35 лет можно отнести: антропогенную деятельность (сельское и лесное хозяйство), ветровалы, пожары, деятельность бобров, усыхание ели и распространение широколиственных видов, наступление верховых болот, зарастание вырубок и заброшенных сельскохозяйственных угодий и т.д.

Антропогенная деятельность. На хорошо дренированных склонах моренных гряд и холмов, где можно достигнуть относительно высоких показателей продуктивности, ведется сельское и лесное хозяйство. Поля в первую очередь представлены сенокосами и пастбищами, к настоящему времени многие из них заброшены и зарастают мелколиственными лесами. Лесные угодья территории исследования активно эксплуатируются, например, центральная меридионально вытянутая моренная гряда почти вся вырублена и на месте высокобонитетных ельников сейчас произрастают вторичные елово-мелколиственные и мелколиственно-еловые леса.

Ветровалы. За рассматриваемый период на территории исследования были как массовые, так и групповые ветровалы. Они наступают с периодичностью примерно 10 лет. Сильный ветровал был в 1987 году, который существенно изменил растительный покров на севере, северо-востоке

ядра заповедника (Рисунок 2.24). В восточной части, между поселком Заповедный и верховым болотом Старосельский Мох, основное влияние оказал ветровал 1996 года, который стал самым сильным за рассматриваемый временной промежуток (Рисунок 2.24). По данным Landsat его площадь составила более 3 км². Следующий ветровал, но уже меньшей силы, был летом 2017 года.

Пожары. В 1998 году к востоку от болота Катин Мох сгорел участок леса площадью 1,5 км².

Деятельность бобров. Бобры обезлесили поймы ручьев и рек первого и второго порядка. На рисунке 2.24 показано, что поймы таких рек как Межа и Тюзьма наиболее подверглись влиянию данного зоогенного фактора.

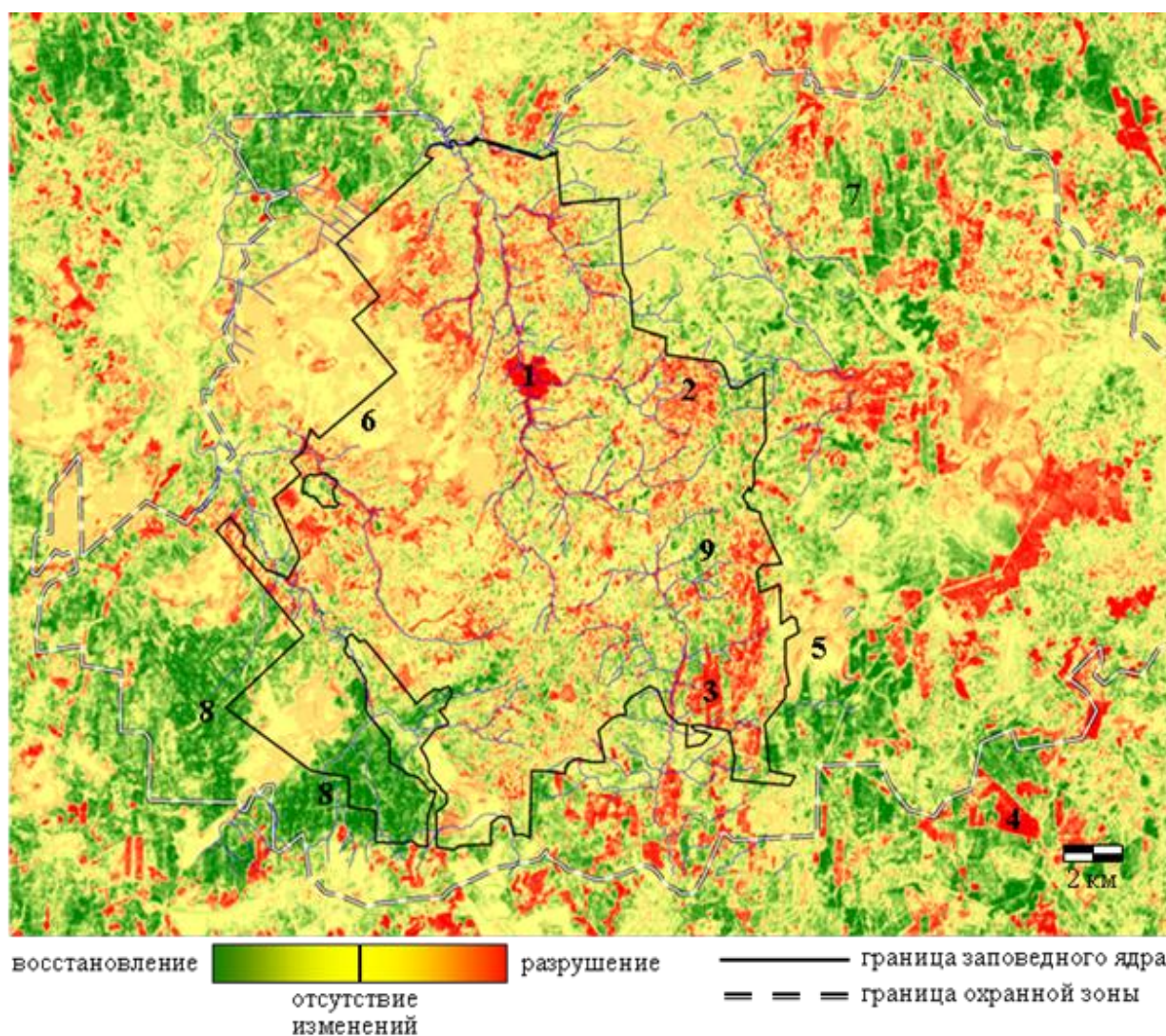


Рисунок 2.24 Картограмма изменений ландшафтного покрова заповедника с 1987 по 2010 год (Пузаченко и др., 2014). Цифрами обозначены: 1 – гарь 1998

года, 2 – вывал 1987 года, 3 – вывал 1996 года, 4 – вырубка 1999 года, 5 – верховое болото Старосельский Мох, 6 – верховое болото Катин Мох, 7 – вырубки 1980-х годов, 8 – вырубки 1970-х годов, 9 – вывал 1970-х годов

Динамика древостоя. Для мониторинга динамики древостоя проводятся повторные измерения на трансектах: «Лесной» (длина 6 км с шагом 20 метров), трансект 1993/1994 года (просеки 96/97, 81/82 квартала, длина 6600 метров, шаг 20 метров), трансект через урочище «Красное» (2600 метров с шагом 20 метров). В 2019 году был заложен и описан трансект «Межа», его длина составила 1720 метров с шагом 20 метров (Рисунок 2.25). Повторные описания трансекта «Лесной» планируются в 2025 году.

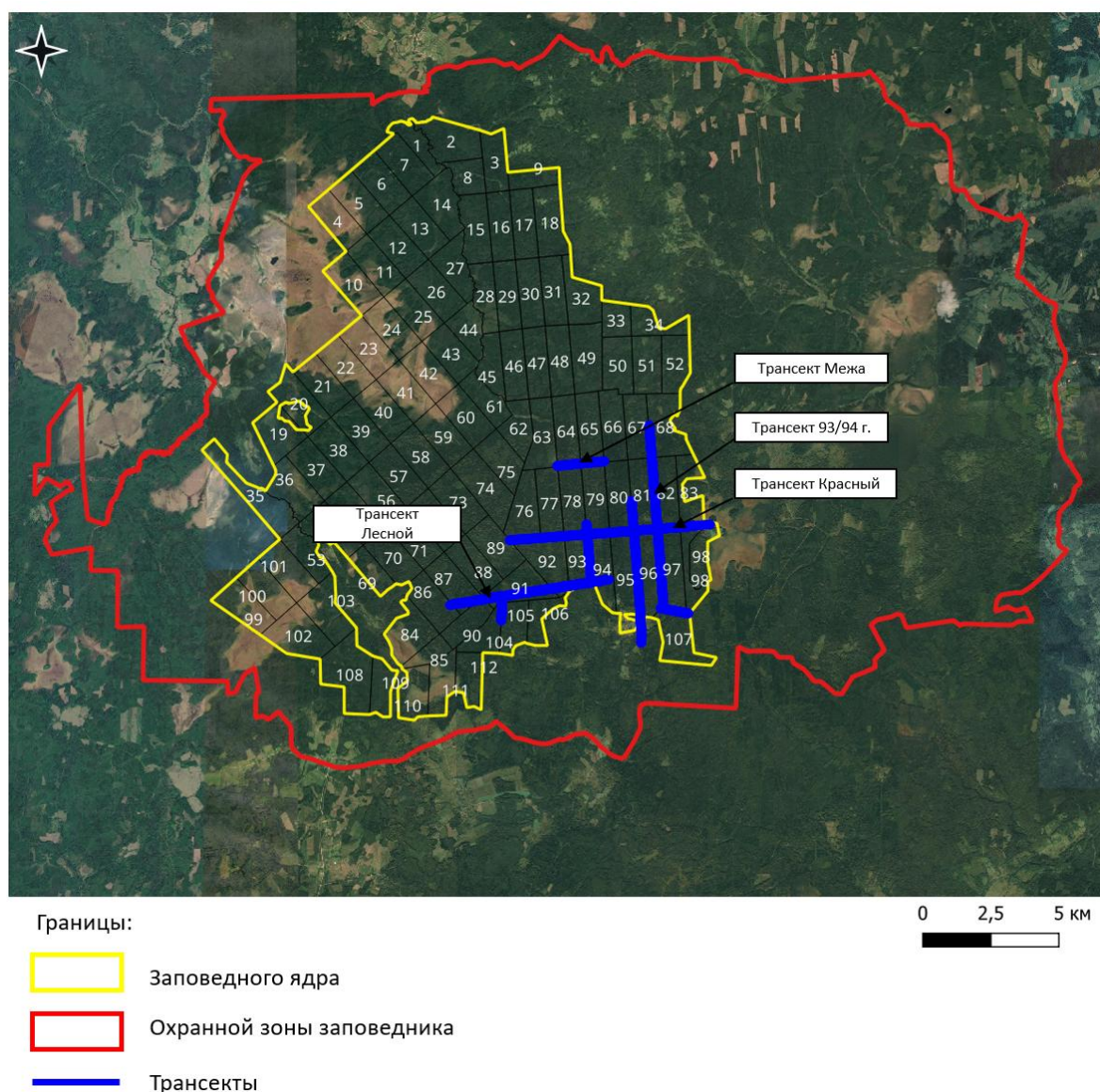


Рисунок 2.25 Схема расположения трансектов (подписаны трансекты с систематическими повторными измерениями)

Трансект «Лесной». Измерения суммы площадей сечения пород (СПС) деревьев реласкопом-полнотомером проводились 2015, 2018, 2021, 2023 гг. За последние 8 лет основные изменения древостоя на данном трансекте преимущественно связаны с групповым ветровалом 2017 года. Однако, в последние годы из-за изменения климата наблюдаются и локальные усыхания ели на слабодренированных участках (10% точек трансекта, около 600 метров). В полученных после вывала окнах наблюдается активный прирост елового подлеска. Также осветление стимулировало фотосинтез и у травяно-кустарничкового яруса, например, у черники. Несмотря на то, что для краевых частей трансекта и на отдельных участках его основной части зафиксировано уменьшение суммы площадей сечения, на значительной части трансекта наблюдается ее увеличение. В общей сложности, за 8 лет около 30% трансекта претерпело катастрофическое изменение древостоя.

Трансект «Красное». Данный трансект проходит по маршруту «р. Межа – Урочище Красное – верховое болото Старосельский Мох». Он был заложен и описан в 2006 году. С научной точки зрения данный трансект интересен так как на нем можно проследить за зарастанием старой залежи, участков после ветровалов 1996 и 2017 годов, а также за изменением границы болота Старосельский Мох, показанным в статье (Пузаченко и др., 2014). Повторные описания древостоя проводились в 2020 году. За 14 лет резко сократилась СПС в западной части трансекта за счет группового вывала 2017 года на склоне долины реки Межи. Урочище Красное, которое с конца 1990-х годов было сенокосом, заросло березой, разница между СПС 2006 и 2014 года составила более 20 м²/га. На восточной части трансекта, которая сильно пострадала во время ветровала 1996 года, также зафиксировано увеличение СПС древостоя на более чем 10 м²/га (Рисунок 2.26).

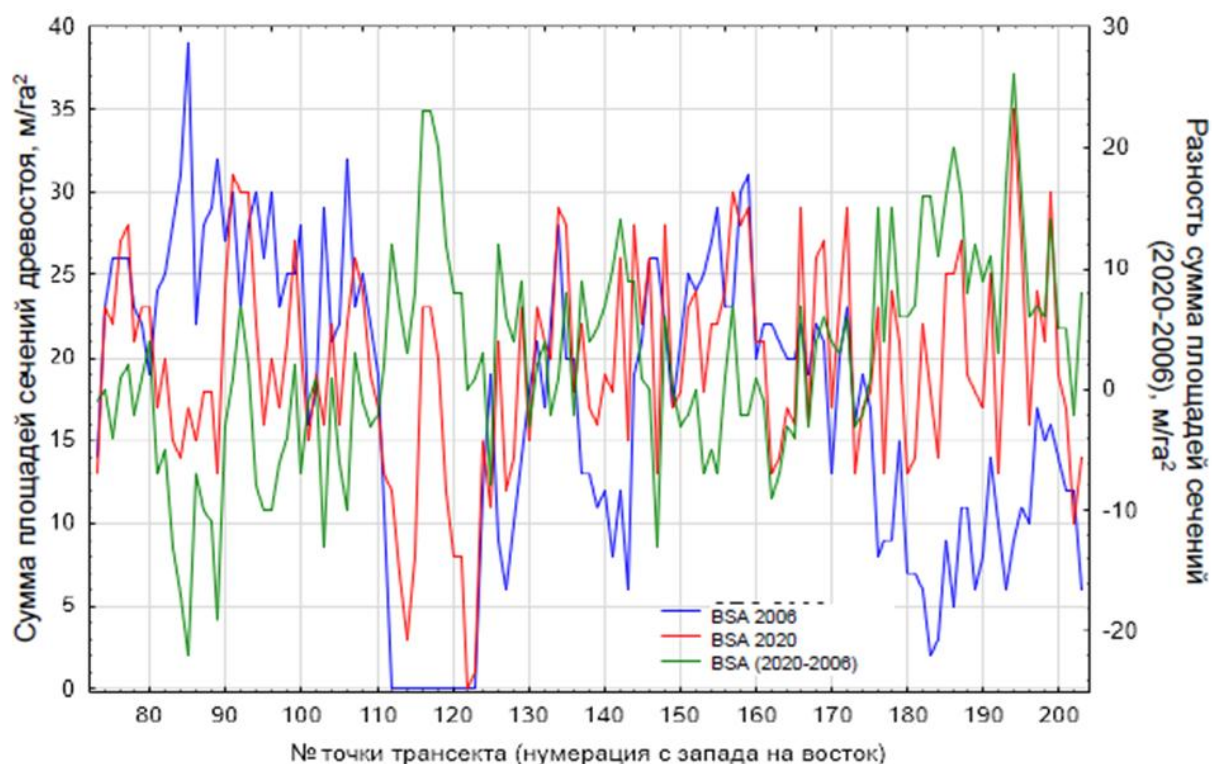


Рисунок 2.26 Варьирование сумм площадей сечения на трансекте «Красное» в 2006 и 2020 году (Отчет по гранту..., 2020 г.)

Трансект 93/94 годов. Трансект вытянут меридионально и проходит по просекам 96/97 и 81/82 кварталов. Он пересекает вершины и верхние части склона моренной гряды, для которых характерно преимущественно неморальные виды древостоя, средние и нижние части склона с доминированием ели и мелколиственных пород, а также широкие слабовыраженные ложбины (100 – 200 метров), занятые черноольховым лесом. Так как первые описания сделаны до ветровала 1996 года, то мы можем оценить его масштабы, а современные измерения дают нам информацию о восстановительной динамике. Первые описания древостоя были выполнены в 1993 и 1994 годах, а повторные были сделаны в ходе полевого сезона 2023 года, соответственно, была оценена динамика за последние 30 лет, что почти совпадает с длинным временного ряда мультиспектральных данных Landsat. Таким образом, было установлено, что почти весь древостой трансекта изменен ветровалом 1996 года. По оценкам М.Ю. Пузаченко, общая СПС пород древостоя упала на 17% за последние 30 лет (Рисунок 2.27), в первую

очередь за счет уменьшения СПС березы, ели, ольхи серой, ивы, рябины, сосны. Однако, зафиксирован прирост СПС клена, ольхи черной, ясеня, липы.

Результаты Гамма-корреляции СПС пород за 2 срока показали, что пространственная стационарность характерна для ясеня, сосны, вяза, липы, ольхи черной, в то время как СПС ели, березы, рябины, ивы кардинально изменились (корреляция недостоверна или принимает маленькие значения).

Согласно таблице 2.2, на 40% точек трансекта зафиксировано сильное изменение общего СПС древостоя. При этом, на рисунке 2.27 видно, что увеличение общего СПС наблюдается только на 40% точек и, в первую очередь, за счет незначительных изменений ($< 5 \text{ м}^2/\text{га}$), в то время как ее уменьшение на большей части трансекта (60%).

Таким образом, анализ сумм площадей сечения пород древостоя за последние 30 лет показал существенные изменения, в первую очередь у бореальных пород. Выявлена тенденция неморализации древесного яруса.

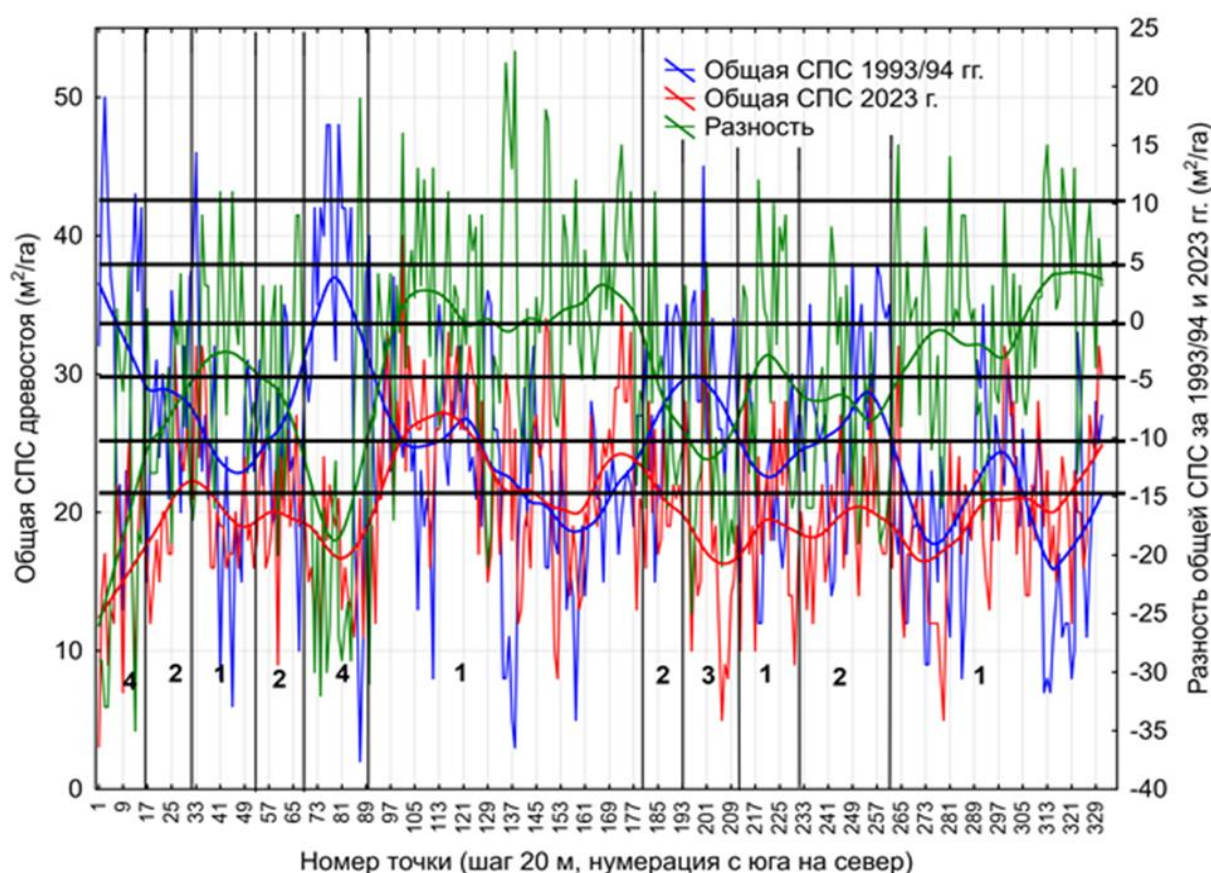


Рисунок 2.27 Общая СПС и разность за 1993/94 гг. и 2023 г. по трансекту со сглаживанием методом минимальных квадратов. (по данным М.Ю. Пузаченко)

Таблица 2.2 Результаты оценки разности общего СПС древостоя за 1993/1994 – 2023 г.

Разность общего СПС древостоя	%, занимаемый на трансекте
< 5 м ² /га	60%
5 – 10 м ² /га	22%
10 – 15 м ² /га	6%
> 15 м ² /га	12%

2.5 Почвенный покров

Территория заповедника относится к Прибалтийской провинции дерново-подзолистых слабо-гумусированных и болотно-подзолистых почв и к Валдайскому округу с дерново-подзолистыми, дерново-подзолистыми остаточно-карбонатными, дерново-подзолистыми-глеевыми почвами (Почвенно-геологические условия..., 1984). Основные типы почв представлены в таблице 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3 Основные типы почв ЦЛГЗ (Отчёт полевой ландшафтной практики студентов II курса, 2012).

1977	2004
Болотно-подзолистые	Подзолисто-глеевые, торфяно-подзолисто-глеевые
Подзолистые	Подзолистые
Бурозёмы	Бурозёмы
Дерново-глеевые	Тёмногумусово-глеевые
Аллювиальные	Аллювиальные гумусовые, аллювиальные тёмногумусовые глеевые, аллювиальные гумусовые глеевые
Болотные	Торфяные олиготрофные, торфяные олиготрофные глеевые, торфяные эутрофные, торфяные эутрофные глеевые

Таблица 2.4 Типы почв Центрально-Лесного заповедника (Центрально-Лесной..., 2007)

Рельеф	Растительные сообщества	Тип почвы
Выпуклые водораздельные поверхности и склоны	Неморальные (с липой, кленом и вязом) и широколиственные (с дубравными видами) ельники	Дерново-палево-средне-слабо подзолистая
Вогнутые склоны	Папоротниковые ельники	Дерново-слабо-среднеподзолистая глееватая
Выпуклые водораздельные поверхности и склоны	Луга, постепенно зарастающие березняками (бывшие с/х угодья)	Агродерновая подзолистая
Плоские и слабонаклонные поверхности	Зеленомошные, кисличные (редко), чернично-кисличные и черничные ельники	Подзолистая (глееватая)
Вогнутые плоские поверхности	Осоково-сфагновые, хвощово-сфагновые ельники	Торфяно-подзолистая глееватая
Долины временных и постоянных водотоков	Черноольховые с примесью ели и лиственных пород влажнотравные леса	Перегноино-глеевая
Флювиогляциальные озерные котловины	Черничные и сфагново-черничные ельники	Торфяно-подзолистая глееватая (глеевая)
Межгрядовые котловины	Сфагновые осоково-брусничные с болотными кустарничками сосняки	Торфяно-глеевая
Грядово-мочажинные комплексы центральных частей верховых болот	Сосняки разреженные (гряды) шейхцериево-очеретниково-пушицевые сообщества (мочажины)	Торфяная
Долины рек	Влажные пойменные луга	Перегноино-гумусовая глееватая

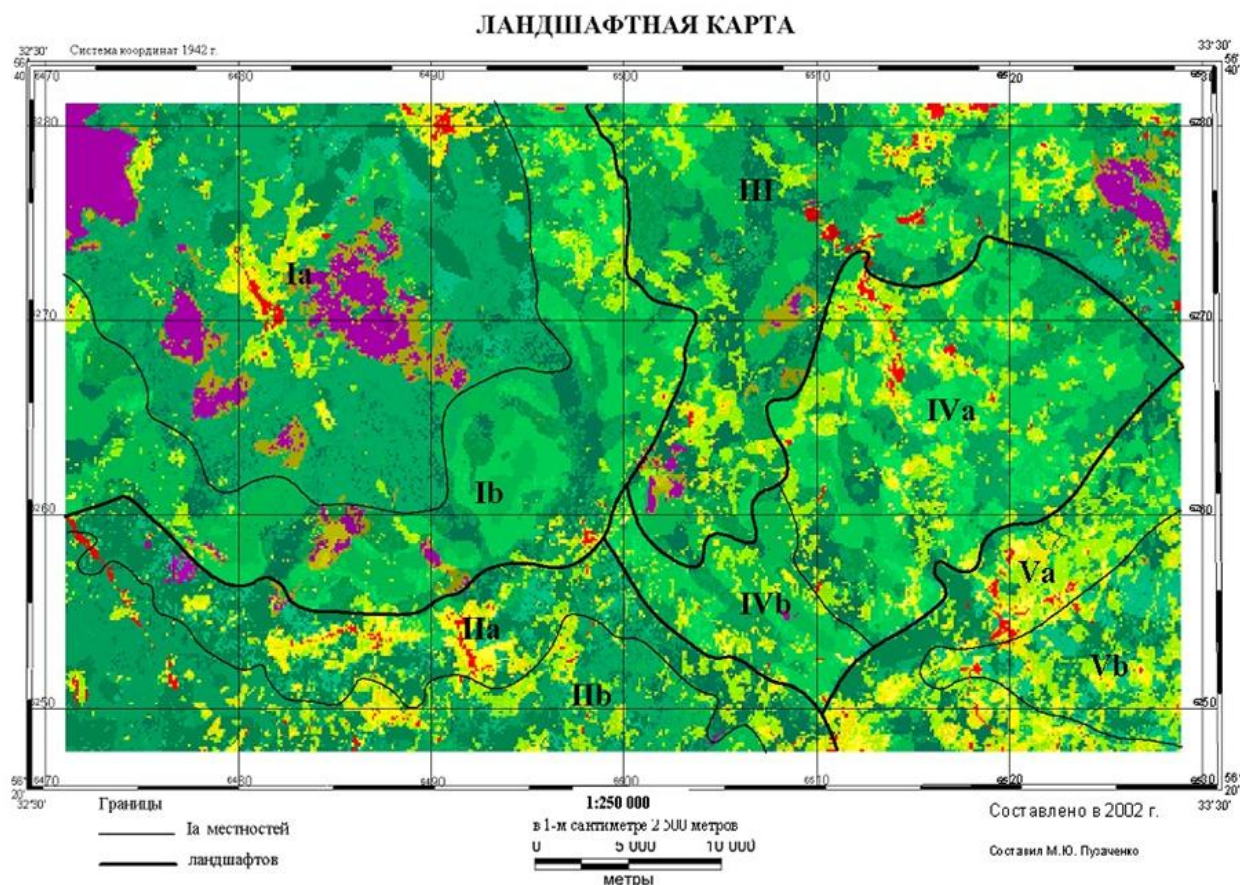
Геотермические и геоморфологические условия территории исследования имеют принципиально важное значение в формировании структуры почвенного покрова, перераспределение влаги между различными

формами рельефа является одним из основным фактором формирования почв в ЦЛГЗ (Васенев, Таргульян, 1995, Карпачевский, Строганова, 1987, Гончарук, 2007). Наибольшие площади заповедника занимают подзолистые, подзолисто-болотные и болотные типы почв. На более дренированных участках с высокопродуктивными ельниками можно встретить дерново-палево-подзолистые и дерново-слабо-средние и сильноподзолистые почвы, для которых характерен развитый гумусовый горизонт, сменяющийся подзолистым. Также у этих почв наблюдается кислая реакция и ненасыщенность основаниями (Строгонова и др., 1979).

Для пологих слабодренированных участков водораздельных повышений характерны торфянистые и торфяно-глеевые подзолистые с мощной торфянистой подстилкой с низким содержанием зольных элементов. В подзолистом горизонте присутствуют признаки оглеения. В отрицательных формах рельефа таких, как водораздельные понижения и депрессии между моренными холмами, формируются торфяники и торфяно-глеевые почвы (Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги, 1973).

2.6 Ландшафтная структура

Несмотря на то, что на территории Центрально-Лесного заповедника работают коллективы физгеографов, ландшафтоведов, а также проводятся учебные и производственные практики студентов, ландшафтные карты не составляются. Единственная ландшафтная карта среднего масштаба была выполнена М.Ю. Пузаченко на основе совместной классификации рельефа и единичного снимка Landsat 7 с целью выделения однородных объектов по спектральным характеристикам наземного покрова и морфометрических параметров рельефа (Рисунок 2.28). В общей сложности, выделено 55 урочищ, которые объединены в местности и ландшафты, исходя из генетической информации о территории и пространственной мозаики (морфологии ландшафта) полученных типов пространственных объектов.



I - слабоволнистых замедленно дренированных моренно-озерно-водноледниковых равнин

Ia- слабоволнистая заболоченная моренно-водноледниковая равнина:

Доминантные и субдоминантные урочища:

- 1) ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под елово-мелколиственными кисличными и кислично-сфагново-черничными лесами на подзолистых глееватых и торфяно-подзолистых глееватых почвах
- 2) ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под смешанными и мелколиственными хвощево-папоротниковыми лесами на подзолистых глееватых почвах
- 3) ровные очень слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми суглинками и песками (с проявлением карстовых процессов) под верховыми болотами с сосновым редколесьем и безлесными сфагновыми и пушицево-сфагновыми на торфяных почвах мощностью до 2 и более метров
- 4) вогнутые слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под еловыми чернично-кисличными, елово-мелколиственными и мелколиственными разнотравно-кисличными лесами на подзолистых глееватых и дерново-сильноподзолистых почвах
- 5) ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под елово-мелколиственными с участием ольхи серой неморально-кисличными лесами на слабодерново-палево-подзолистых почвах
- 6) ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и озерно-ледниковыми песками, суглинками и глинами мощностью до 2 и более метров под мелколиственно-еловыми черничными лесами на подзолистых почвах
- 7) слабовыпуклые дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 50 см, подстилаемые водно-ледниковыми песками на морене под зарастающими полями, молодыми вырубками, сенокосами и пастбищами, огородами и населенными пунктами на дерново-сильно и среднеподзолистых почвах

Ib-грядовая неравномерно дренированная моренно-озерноледниковая равнина

Доминантные и субдоминантные урочища:

- 1) ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и озерно-ледниковыми песками, суглинками и глинами мощностью до 2 и более метров под мелколиственно-еловыми черничными и неморально-кисличными лесами на подзолистых и дерново-сильноподзолистых почвах
- 2) ровные неравномерно дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 80 см, подстилаемыми мореной и озерно-ледниковыми песками, суглинками и глинами мощностью до 1 м под мелколиственно-еловыми с участием широколиственных пород неморально-кисличными и липняково-ясениковыми лесами на слабо и среднедерново-палево-подзолистых почвах
- 3) вогнутые очень слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 1 м, подстилаемыми моренами и озерно-ледниковыми песками и глинами мощностью до 1 м и более под мелколиственно-хвойными чернично-сфагновыми лесами на торфяно-подзолистых и торфяных почвах

 6) вогнутые очень слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 1 м, подстилаемыми озерными песками и глинами мощностью до 1 м и более под мелколиственно-хвойными чернично-сфагновыми лесами на торфяно-подзолистых и торфяных почвах

 7) ровные очень слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см, подстилаемыми мореной и озерно-ледниковыми суглинками и песками под верховыми болотами с сосновым редколесьем и безлесными сфагновыми и пушицево-сфагновыми на торфяных почвах мощностью до 2 и более метров

IV - увалисто-холмистых дренированных моренно-водноледниковых структурных равнин:

IVa – увалисто-холмистых дренированных моренно-водноледниковых структурных равнин:

Доминантные и субдоминантные урочища:

 1) ровные неравномерно дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 80 см, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками мощностью до 1 м под мелколиственно-еловыми с участием широколиственных пород неморально-кисличными и липняково-ясенниковыми лесами на слабо и среднедерново-палево-подзолистых почвах

 2) вогнутые долинные дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см подстилаемые мореной и водно-ледниковыми песками и супесями мощностью до 1 м под елово-мелколиственными кислично-неморальными лесами на дерново-средне и слабо-подзолистых почвах

 3) выпуклые дренированные поверхности сложенные покровными суглинками подстилаемые мореной и водно-ледниковыми отложениями под мелколиственно-еловыми с примесью широколиственных пород липняково-ясенниковыми и неморально-кисличными лесами на средние и слабо-подзолистых почвах

 4) вогнутые очень слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 1 м, подстилаемыми моренами и водно-ледниковыми песками под мелколиственно-хвойными чернично-сфагновыми лесами на торфяно-подзолистых и торфяных почвах

 5) вогнутые долинные слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 1 м и более подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми отложениями до 2 м под елово-мелколиственными кислично-брусничными и мелколиственными разнотравно-папортниковыми лесами на торфяно-подзолистых глееватых и глеевых почвах

 6) ровные и выпуклые дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 1 м подстилаемые моренами и озерно-водноледниковыми песками и суглинками мощностью до 2 м и более под зарастающими полями и молодыми вырубками на подзолистых и дерново-сильноподзолистых почвах

IVb – грядово-холмистых слабодренированных моренно-озерно-водноледниковых структурных равнин

Доминантные и субдоминантные урочища:

 1) ровные неравномерно дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 50 см, подстилаемыми мореной и озерно-водноледниковыми суглинками мощностью до 1 м под мелколиственно-еловыми с участием широколиственных пород неморально-кисличными и липняково-ясенниковыми лесами на слабо и среднедерново-палево-подзолистых почвах

 2) ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 50 см, подстилаемыми мореной и озерно-ледниковыми песками и суглинками мощностью до 1 метра под мелколиственно-хвойными черничными и бруснично-кисличными лесами на торфяно-подзолистых и подзолистых глееватых и глеевых почвах

 3) слабоогнутые придолинные дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 70 см подстилаемые мореной и водно-ледниковыми суглинками мощностью до 1 м под елово-мелколиственными кислично-неморальными лесами на дерново-средне и слабо-подзолистых почвах

 4) выпуклые дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 50 см подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками отложениями мощностью до 1 м под мелколиственно-еловыми с участием широколиственных пород неморально-кисличными и липняково-ясенниковыми лесами на дерново-средне и слабо-подзолистых почвах

 5) вогнутые очень слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 50 см, подстилаемыми моренами и водно-ледниковыми песками и супесями под мелколиственно-хвойными чернично-сфагновыми лесами на торфяно-подзолистых-глеевых и торфяных почвах мощностью до 2 м

V – холмистых неравномерно дренированных моренно-водноледниковых равнин:

Va – сильно холмистых неравномерно дренированных моренно-водноледниковых равнин:

Доминантные и субдоминантные урочища:

 1) вогнутые слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под еловыми чернично-кисличными и елово-мелколиственными и мелколиственными кисличными лесами на подзолистых глееватых и подзолистых почвах

 2) вогнутые долинные слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 1 м и более подстилаемые мореной и водно-водноледниковыми отложениями до 2 м под елово-мелколиственными кислично-брусничными и мелколиственными разнотравно-папортниковыми лесами на перегнойно-подзолистых глееватых и глеевых почвах

 3) ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 150 см, подстилаемые мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под мелколиственно-хвойными черничными и бруснично-кисличными лесами на торфяно-подзолистых и подзолистых глееватых и глеевых почвах

 4) вогнутые и ровные слабодренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под зарастающими полями и молодыми вырубками на дерново-сильно-подзолистых и подзолистых почвах

 5) ровные и выпуклые дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под сенокосами, пастбищами, огородами и населенными пунктами на дерново-сильно и средне-подзолистых почвах

 6) слабоогнутые придолинные дренированные поверхности сложенные покровными суглинками подстилаемые мореной и водно-ледниковыми суглинками под елово-мелколиственными кислично-неморальными лесами на дерново-средне и слабо-подзолистых почвах

 7) ровные неравномерно дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и озерно-водноледниковыми суглинками под мелколиственно-еловыми с участием широколиственных пород неморально-кисличными и липняково-ясенниковыми лесами на слабо и среднедерново-палево-подзолистых почвах

Vb – холмистых слабо дренированных моренно-водноледниковых равнин:

Доминантные и субдоминантные урочища:

-  1) вогнутые слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под еловыми чернично-кисличными и елово-мелколиственными и мелколиственными кисличными лесами на подзолистых глееватых и подзолистых почвах
-  2) ровные слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми отложениями под зарастающими полями и свежими вырубками на подзолистых и дерново-слабоподзолистых почвах
-  3) ровные слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками мощностью до 50 см, подстилаемые мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками мощностью до 1 м под мелколиственными неморально-кисличными лесами на среднедерново-палево-подзолистых почвах
-  4) ровные дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми отложениями под мелколиственными неморально-кисличными лесами на дерново-слабо и средне-подзолистых почвах
-  5) ровные слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под елово-мелколиственными с участием ольхи серой неморально-кисличными лесами на дерново-слабоподзолистых почвах
-  6) ровные слабо дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми песками и суглинками под смешанными и мелколиственными хвощево-папортниковыми лесами на подзолистых глееватых почвах
-  7) ровные и слабовыпуклые дренированные поверхности сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной и водно-ледниковыми отложениями (иногда озами) под сенокосами и пастбищами на дерново-слабо и средне-подзолистых почвах

Рисунок 2.28 Ландшафтная карта среднего масштаба (Центрально-Лесной заповедник и прилегающая территория) (Пузаченко М.Ю., 2002)

Согласно ландшафтной карте, на территории ЦЛГЗ присутствуют разные типы урочищ, как было сказано выше, большая часть их представлена различными еловыми лесами, отличающихся степенью заболоченности (Рисунок 2.29):

1. Ельники неморальные на дерново-подзолистых почвах на вершинах и выпуклых частях склонов моренных гряд и холмов. Помимо ели здесь присутствуют осина, береза, липа, вяз и клен. В подлеске рябина, липа мелколистная, лещина, жимолость, калина, крушина. В травянисто-кустарничковом ярусе наблюдается сочетание как бореальных, так и неморальных видов трав. Например, нередко вместе произрастают такие бореальные виды как кислица, линнея северная, майник с неморальными видами, представленными зеленчуком, ясменником, звездчаткой и т.д. Данные ельники являются самыми «сухими», хорошо дренированными, поэтому здесь отмечается самая большая продуктивность экосистем и видовое разнообразие растительного покрова.

2. Клено-ельники и кислично-щитовниковые, снытьевые, зеленчуковые липо-ельники на дерново-слабо -, среднеподзолистых почвах в нижних частях склонов моренных гряд и холмов, где отмечается интенсивный транзит питательных веществ и влаги (Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги, 1973). Отличительной особенностью этих ельников

можно считать наличие нескольких ярусов травянистого яруса, так первый ярус представлен густыми зарослями папоротника, под которым, во втором ярусе, произрастает печеночница благородная, медуница неясная и т.д.

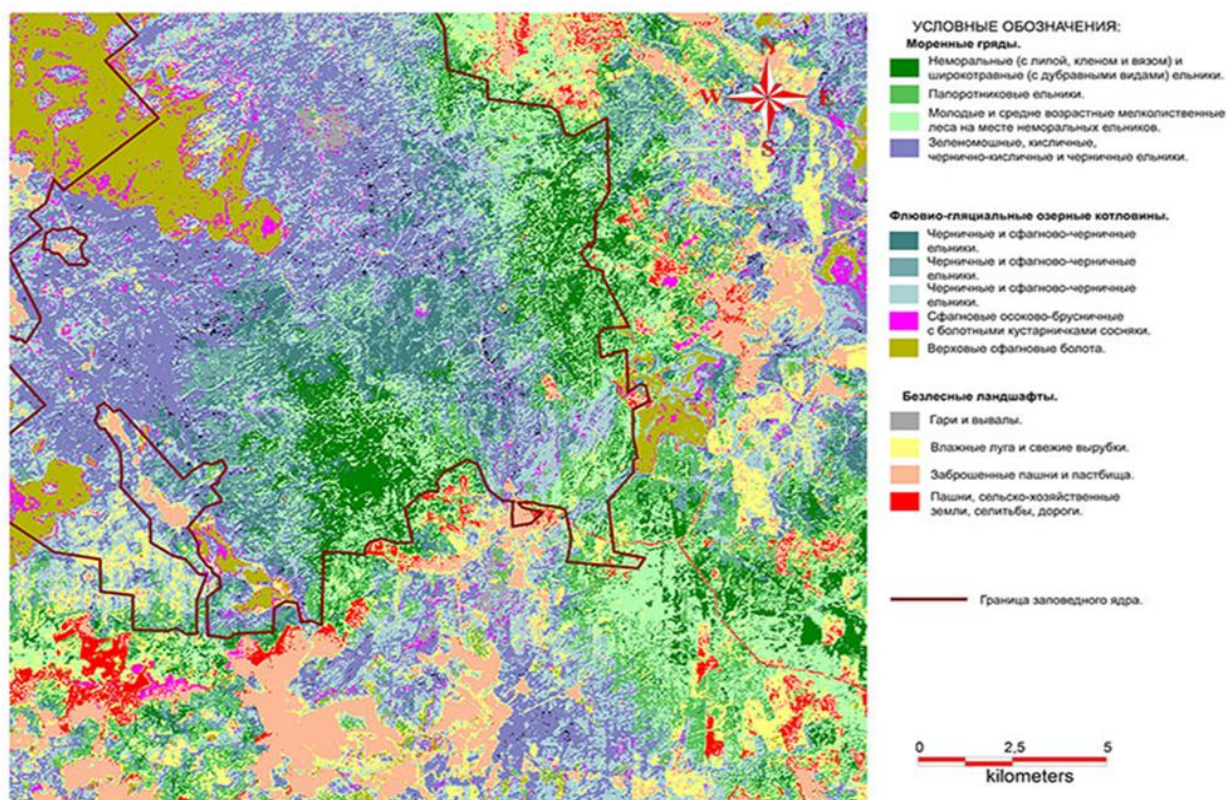


Рисунок 2.29 Схема типов ландшафтного покрова ЦЛГЗ

Источник: <http://www.clgz.ru/page.php?al=relief>

3. Ельники чернично-кисличные и кисличные на подзолах и дерново-подзолистых почвах на моренных плакорах. Для них характерно наличие ели в первом ярусе, осины и березы – во втором, в кустарничковом ярусе встречается жимолость, волчье лыко, малина, в травянисто-кустарничковом ярусе доминирует кислица, майник, черника и т.д. Сфагнум встречается только в микропонижениях.

4. Ельники черничники и чернично-сфагновые на подзолистой глееватой почвы в нижней части пологих склонов моренных гряд и холмов.

5. Ельники осоково-сфагновые и хвощево-сфагновые на торфянисто-подзолистой глееватой почве в слабопроточных депрессиях.

6. Ельники сфагново-черничные на торфяно-подзолистых глееватых почвах в флювиогляциальных озерных котловинах. Они занимает

незначительную площадь и не считается типичными для данной территории. Такое место произрастания леса считается наиболее переувлажненным, из-за этого у деревьев преобладает IV бонитет. Данные ельники отмечаются простотой устройства растительного покрова, представленного исключительно елью, сфагнумом и черникой.

7. Ельники чернично-осоково-сфагновые и осоково-сфагновые на болотных торфяно-глеевых почвах в понижениях рельефа. Ввиду сильного переувлажнения в ельниках данного типа активно проходит процесс заболачивания, поэтому здесь отмечается маленькая продуктивность экосистем.

Сосновые леса представлены сфагновыми осоково-брусничными сосняками на торфяно-глеевой почве в межрядовых котловинах и мелкими рядами на торфяной почве, приуроченными к окраинным частям болот. Дендрохронологический анализ установил, что средний возраст деревьев молодого сосняка не превышает 35 лет. Помимо деревьев, растительный покров представлен кустарничковым (черника, клюква, единичные кусты брусники, морошки, голубики) травянистым (осоки (*Carex*), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum*) росжанка круглолистная (*Aldrovanda vericulosa*)), моховым (сфагнум) ярусами.

Верховые болота представляют собой сочетание багульниково-сфагновых гряд и осоково-шейхцериевых или шейхцериево-очеретниково-пушицевых мочажин на торфяной почве.

Наименьшие площади на территории заповедника занимают пойменные урочища. Долины рек представлены черноольховыми с примесью ели и лиственных пород влажнотравными лесами на перегнойно-глеевой почве и пойменными лугами на перегнойно-гумусовой глееватой почве.

Глава 3 Материалы и методы

3.1 Мультиспектральные данные съемочной системы Landsat TM, ETM+, OLI, OLI2

Истории программы Landsat насчитывает уже более половины века, это самый продолжительный проект по периодическому сканированию поверхности Земли из космоса. В 1967 году была официально начата разработка первого спутника, который был выведен на орбиту в 1972 году. Следующие запуски были в 1975 г. (Landsat 2), 1978 г. (Landsat 3), 1982 г. (Landsat 4), 1984 г. (Landsat 5), 1993 г. (Landsat 6 из-за аварии не выведен на целевую орбиту), 1999 г. (Landsat 7), 2013 г. (Landsat 8), 2021 г. (Landsat 9). Последующие поколения спутников сохранили преемственность, однако включали в себя новые технологические достижения, что способствовало широкому оперативному использованию продуктов Landsat (Wulder et al, 2019) (Таблица 3.1). В общей сложности, на сегодняшний день съемочными системами Landsat 1 – 9 поколения сделаны миллиарды снимков, которые послужили основой для дистанционного оперативного изучения наземных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов, например, сцены Landsat – основа для национальных и международных программ, связанных с такими проблемами, как обезлесение, опустынивание, влияние изменения климата и т.д. Программа Landsat сыграла решающую роль во многих научных и технических достижениях (Wulder et al, 2022), а так же породила революционное использование космических данных в коммерческой деятельности и стимулировала появление нового поколения частных спутников, которые обеспечивают региональными изображениями с высоким разрешением (Williams et al, 2006). Спрос на продукты Landsat продолжает расти, по современным оценкам, ежемесячно с сайта Геологической службы США (USGS) скачивается более миллиона снимков Landsat (Wulder et al, 2019). Количество опубликованных исследований на основе данных снимков исчисляется тысячами (Lulla et al, 2021).

Таблица 3.1 Технические характеристики спутников Landsat

Спутник	Параметры орбиты				Съемочное оборудование	
	Орбита	Высота орбиты	Период обращения	Повторяемость съемки	Камеры	Разрешение
Landsat 1	Солнечно-синхронная, субполярная	917 км	103 мин.	1 раз в 18 дней	RVB	80
Landsat 2					MSS	80
Landsat 3					RVB	80
Landsat 4		705 км	98,9 мин.	1 раз в 16 дней	MSS	80
Landsat 5					TM	30
Landsat 7						120 (TIR)
Landsat 8					MSS	80
Landsat 9					TM	30
						120 (TIR)
					ETM+	15 (pan) 30 (ms) 60 (TIR)
					OLI	15 (pan)
					TIRS	30(ms)
						100 (TIR)
					OLI-2	15 (pan)
					TIRS-2	30(ms)
						100 (TIR)

Расчетное время работы спутника составляет 5 лет (запасы расходных материалов более чем на 10 лет), однако спутники Landsat, как и любая техника не застрахованы от неполадок. Например, первая серьезная неисправность Landsat 4 была зафиксирована через 11 дней после запуска. К

февралю 1983 года он потерял около половины своей солнечной энергии и вместе с этим возможность отправлять свои данные на Землю, поэтому был запущен Landsat 5, который должен был заменить своего предшественника раньше расчетного времени. Существенная неполадка для Landsat 7 произошла в мае 2003 года и связана с отказом работы Корректора Линии Сканирования (SLC). К сожалению, неисправность была необратимой, но, тем не менее, Landsat 7 ETM + продолжал производить съемку в режиме выключенного корректора. Для решения этой проблемы и обеспечения потребителей материалами новой съемки был разработан новый продукт "SLC-off", отсутствующие пиксели изображения заменяются более ранними, до поломки корректора.

Более короткий срок службы у тепловых датчиков, расчетное время работы составляет всего 3 года. Так, длинноволновые данные Landsat 8 TIRS с 2019 года становятся полностью непригодными для проведения анализа на их основе ввиду ошибок съемочной системы. Однако в 2021 году запустили Landsat 9, который схож со своим предшественником. На него установили TIRS-2, который на класс выше TIRS у Landsat 8 за счет улучшенной атмосферной коррекции, связанной с минимизацией рассеянного света. Расчетное время работы TIRS-2 увеличено до 5 лет (Markham et al, 2016). Еще одним преимуществом Landsat 9 можно считать 14-битное квантование, с его помощью лучше распознаются различные оттенки, особенно у темных водных объектов или густых лесов. В таблице 3.2 представлено сравнение трех последних спутников по данным показателям.

Таблица 3.2 Сравнение трех последних спутников Landsat

Landsat 7	Landsat 8	Landsat 9
8-битные данные	12-битные данные	14-битные данные
256 оттенков	4 096 оттенков	16 384 оттенка

Для увеличения временного охвата наблюдений орбита Landsat 9 сдвинута по фазе с Landsat 8 на восемь дней. Ежедневно с Landsat 9 получает 750 сцен, а совместно с Landsat 8 - 1500 (Masek et al, 2020).

Снимки Landsat – не просто изображение «картинка, фото» ландшафтного покрова, а источник информации о важнейших параметрах, отражающих особенности функционирования ландшафтов (Петрушина, 2018; Хорошев, 2021, 2023). Сканирующая система спутников Landsat адаптирована к тому, чтобы представлять информацию о наиболее важных для растительности свойствах солнечного света (Таблица 3.3) (Литинский, 2007; Сандлерский, Пузаченко, 2009; Чабан, 2016). Так, особое значение имеет красный и ближний инфракрасный, которые визуализируют вегетативную активность растительности, с их помощью можно наблюдать за сезонными, годовыми изменениями протекания фотосинтеза (Горбунов, 2023).

Так же информативен средний инфракрасный канал ввиду того, что отражательная способность уменьшается при возрастании содержания воды, он чувствителен к варьированию влаги в почве и растениях, отражает изменения содержания воды в листьях (Горшков, 2010). Поэтому получил широкое применение в маркировании свежих гарей, вырубок (Куулар, 2013; Терехин, 2013; Курбанов, 2014)

Таблица 3.3 Спектральные диапазоны каналов Landsat TM, ETM+, OLI, OLI2 и их роль для растительности (Кронберг, 1987, Мерзляк и др., 1997, Тихомиров и др., 2000, Сандлерский, 2013, Источник: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>, обращение 10.08.2022)

Диапазон длин волн (мкм)	Название	Канал Landsat TM, ETM+	Канал Landsat OLI, OLI2	Роль для растения	Общая интерпретация назначения канала
0.28 – 0.32	Ультра-фиолетовый	-	-	оказывает вредное воздействие	
0.32 – 0.40	Фиолетовый			регуляторная роль, необходимо несколько процентов	
0.40 – 0.45 0.45 – 0.50	Синий			поглощение хлорофиллом <i>a</i>	
		Канал 1	Канал 1		

0.50 – 0.515	Зеленый			отражается или пропускается мезофиллом, важен для затененных листьев	наиболее чувствителен к атмосферным газам
0.515 – 0.52		-	-		
0.52 – 0.60		Канал 2	Канал 2		пик отражательной способности поверхностей листьев, может быть полезен для различения классов растительности
0.60 – 0.63	Красный	-	-	активно поглощается хлорофиллом <i>b</i> , ярко выраженное действие на фотосинтез, развитие и регуляцию процессов,	
0.63 – 0.69		Канал 3	Канал 3		чувствителен в зоне сильного поглощения хлорофилла и в зоне высокой отражательной способности для почв
0.69 – 0.70					
0.70 – 0.75	Дальний красный	-	-	ярко выраженное регуляторное действие, достаточно несколько процентов в общем спектре	
0.75 – 0.77	Ближний инфракрасный	Канал 4	Канал 4	в основном отражается стенками клеток мезофилла листьев	различает растительное многообразие и массу растительности
0.77 – 0.90					
0.90 – 1.20	Инфракрасный	-	-	поглощается внутри- и межклеточной водой, увеличивает скорость тепловых биохимических реакций	
1.20 – 1.55					чувствителен к изменению содержания воды в тканях листьев и варьированию влаги в растительности и почвах (отражательная способность уменьшается при возрастании содержания воды)
1.55 – 1.60		Канал 5	Канал 5		
1.60 – 1.75					
1.75 – 2.09		-	-		
2.09 – 2.35		Канал 7	Канал 7	Неселективное тепловое поглощение	чувствителен к варьированию влаги в растительности и почвах
			-		

В качестве исходных данных были использованы все многоканальные безоблачные снимки для территории Центрально-Лесного заповедника и окрестностей, полученные съемочной системой Thematic Mapper (TM), установленной на спутнике Landsat 5, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (Landsat 7), Operational Land Imager (Landsat 8) и Operational Land Imager 2 (Landsat 9) (Таблица 3.4). В результате, используются все основные каналы (синий, зелёный, красный, ближний инфракрасный (ИК) и два коротковолновых ИК (Таблица 3.5) для 19 сцен (Таблица 3.4), выполненных с 1987 по 2022 годы (5 за февраль, 3 за март, 4 за апрель, 1 за май, 4 за июнь и 2 за сентябрь) (Рисунок 3.1а, 3.1б).

Таблица 3.4 Сцены Landsat, использованные в анализе

Дата	Съемочная система	Дата	Съемочная система
04.02.1987	Landsat 5 TM	17.02.2015	Landsat 8 OLI_TIRS
06.06.1988	Landsat 4 TM	23.03.2016	Landsat 8 OLI TIRS
03.05.1990	Landsat 5 TM	06.02.2017	Landsat 8 OLI_TIRS
27.04.2000	Landsat 7 ETM +	14.04.2018	Landsat 8 OLI_TIRS
27.09.2000	Landsat 5 TM	17.04.2019	Landsat 8 OLI_TIRS
22.03.2001	Landsat 7 ETM +	04.06.2019	Landsat 8 OLI_TIRS
10.04.2002	Landsat 7 ETM +	26.09.2020	Landsat 8 OLI_TIRS
20.06.2002	Landsat 7 ETM +	17.02.2021	Landsat 8 OLI_TIRS
11.02.2007	Landsat 5 TM	24.03.2022	Landsat 9 OLI-2_TIRS-2
03.06.2007	Landsat 5 TM		

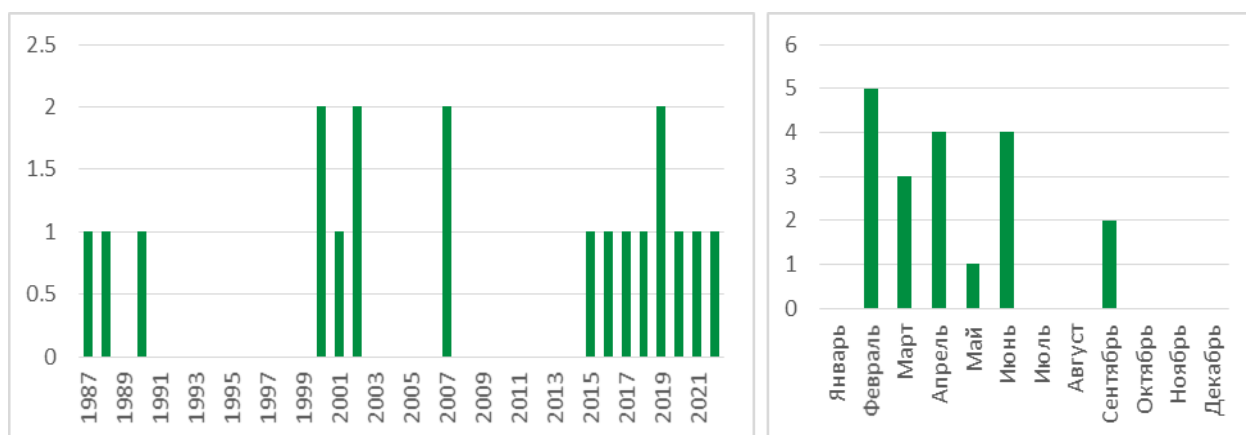


Рисунок 3.1 Количество снимков Landsat, используемых в исследовании, по годам (слева) и по месяцам (справа)

Таблица 3.5 Спектральные диапазоны каналов TM, ETM+, OLI, OLI2, использованные в работе (Источник: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>, обращение 10.08.2022)

Каналы	Длина волны (мкм) Landsat 4, 5, 7	Длина волны (мкм) Landsat 8, 9
Синий	0.45 – 0.515	0.45 - 0.51
Зеленый	0.525 – 0.605	0.53 - 0.59
Красный	0.63 – 0.69	0.64 - 0.67
Ближний инфракрасный	0.77 – 0.90	0.85 - 0.88
Коротковолновый инфракрасный 1	1.55 – 1.75	1.57 - 1.65
Коротковолновый инфракрасный 2	2.09 – 2.33	2.11 - 2.29
Длинноволновый тепловой 1	10.12 – 14.5	10.60 - 11.19
Длинноволновый тепловой 2		11.50 - 12.51

Ввиду причин, указанных ранее, данные теплового канала анализировались отдельно (до 2019 года) и использовались только для выявления семантики классов, полученных при классификации мультиспектральных данных и параметров порядка рельефа.

Все снимки выполнены в утренние часы (Таблица 3.6), максимальная разница сцен по времени съемки составляет 1 час 19 минут (10:28 – 3 мая 1990 г., 11:47 – 24 марта 2022 г.). Отмечается, что в 80-90 гг. съемка производилась раньше почти на час. Наиболее поздними являются сцены Landsat 8 и 9.

Таблица 3.6 Время съемки по местному времени

Съемочная система	Время пролета над заповедником
Landsat 4 TM	10:54 – 11:15
Landsat 5 TM	10:28 – 11:42
Landsat 7 ETM +	11:36 – 11:45
Landsat 8 OLI_TIRS	11:41 – 11:45
Landsat 9 OLI-2_TIRS-2	11:47

3.2 Полевые материалы (геоботанические и почвенные описания)

В работе были использованы результаты полевых практик студентов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и полевых работ сотрудников Института проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Института географии РАН за 30 лет. Геоботанические и почвенные описания были объединены в базу данных MicrosoftAccess с системой запросов для организации и преобразования данных для проведения количественного анализа. В общей сложности, в базе данных более 3 тысяч описаний растительности и около 2 тысяч почвенных (Рисунок 3.2).

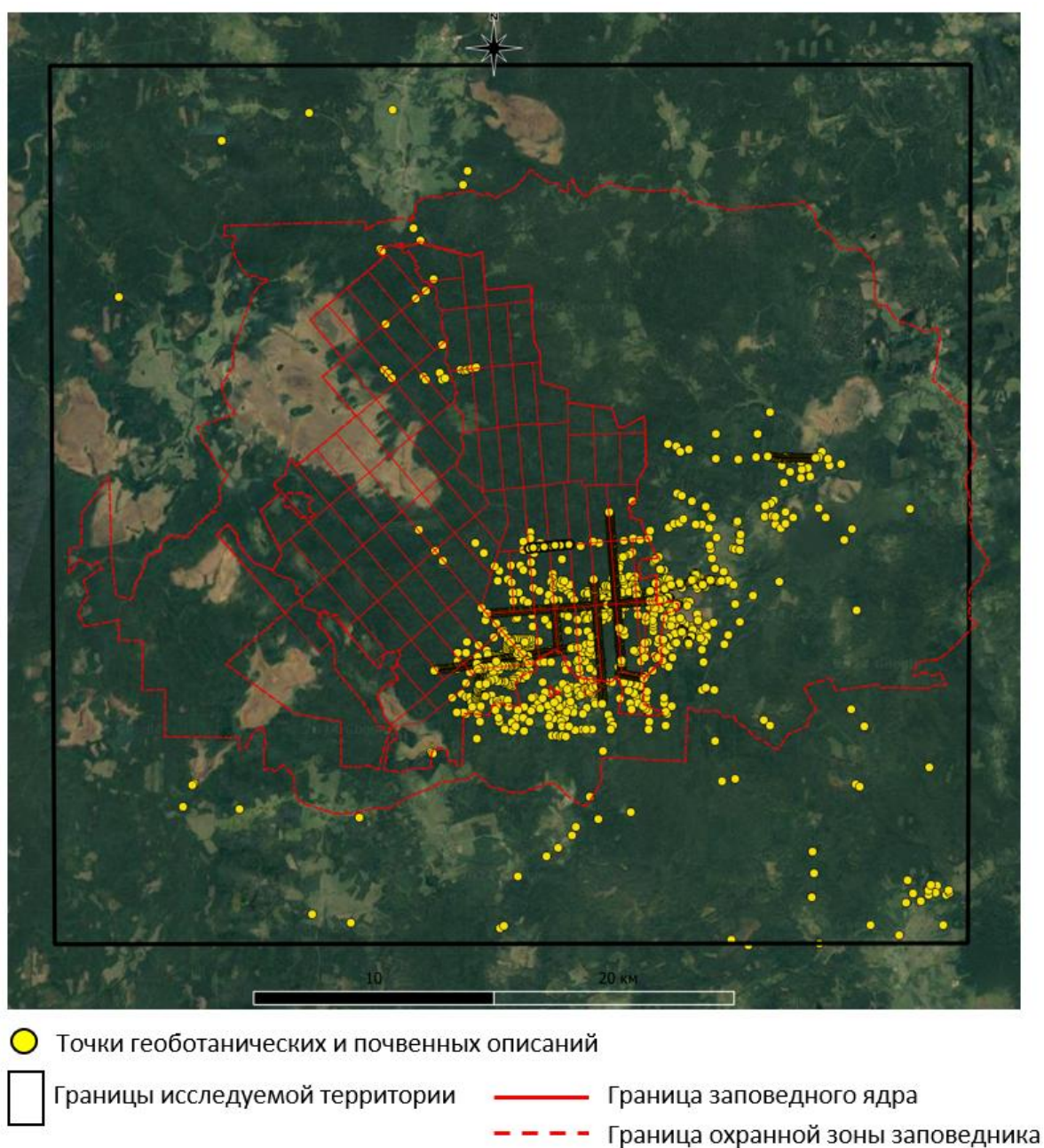


Рисунок 3.2 Карта фактического материала (границы 2023 года)

Согласно рисунку 3.1, большинство описаний сделано на территории южного лесничества. Для отображения квазинепрерывного изменения свойств почв и растительности, значительная часть работ велась на трансектах с шагом 20 метров, который соизмерим с размером фации или пикселя (30 метров).

Описание растительности.

Геоботанические описания содержат информацию о древесном, травянистом и моховом ярусах. Параметры растительного яруса, использованные в работе, представлены в таблице 3.7.

3.7 Параметры растительного покрова, использованные в работе

Древостой	Видовой состав древостоя по ярусам	Формула древостоя для каждого яруса (10-бальная система)
	Сомкнутость крон	Определяется в долях от единицы
	Средняя высота древостоя и средняя высота по ярусам	Определяется визуально или эклиметром, [м]
	Средний диаметр	Измеряется на высоте 1,3 м, [см]
	Средний возраст древостоя	Выявляется бурением буром Пресслера, [лет]
	Полнота древостоя (сумма площадей сечения древостоя на гектар и частные суммы площадей сечения по породам)	Измеряется релаксометром-полнотрометром отдельно для живых и мертвых представителей каждого вида, [м ² /га]
Подрост и Подлесок	Общее проективное покрытие и проективное покрытие по породам	Измеряется в процентах, [%]

Травяно-кустарничковый ярус	Общее проективное покрытие трав	Измеряется в процентах, [%]
	Проективное покрытие трав по видам	Измеряется в процентах по шкале О. Друде, [%]
Моховой ярус	Общее проективное покрытие мхов	Измеряется в процентах, [%]
	Проективное покрытие мхов по группам: листочекные (зеленые мхи), политриховые (долгомошные), сфагновые	Измеряется в процентах, [%]

Для травяно-кустарничкового яруса были выделены диагностические виды, выявленные по частоте их встречаемости и обилию (проективному покрытию) по методу (Dufrêne, Legendre, 1997). На основе данных видов выполнена классификация с учетом преобладающих эколого-ценотических групп (Черненкоова, Морозова, 2017; Байбар и др., 2019). Кластеризация была выполнена методом Varda (Ward's optimal agglomeration method). В качестве меры близости между объектами взята корреляция Пирсона. В результате были получены следующие группы:

Таблица 3.8 Группы травяно-кустарничкового яруса

Группа	Доминанты
Неморально-бореальная	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Stellaria nemorum</i> , <i>Dryopteris dilatata</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i>
Неморально-богатовлажнотравная	<i>Urtica dioica</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Dryopteris dilatata</i> , <i>Equisetum</i>

	<i>sylvaticum, Galeobdolon luteum, Geum rivale, Gymnocarpium dryopteris, Maianthemum bifolium, Phegopteris connectilis</i>
(Неморально)-бореальная	<i>Oxalis acetosella, Dryopteris dilatata, Equisetum sylvaticum, Maianthemum bifolium, Stellaria holostea</i>
Бореальная	<i>Vaccinium myrtillus, Oxalis acetosella, Maianthemum bifolium, Trientalis europaea, Eriophorum vaginatum. Vaccinium vitis-idaea</i>
Влажнотравно-бореальная	<i>Carex vesicaria, Dryopteris dilatata, Oxalis acetosella, Vaccinium myrtillus</i>
Влажнотравно-неморальная	<i>Filipendula ulmaria, Hypericum perforatum, Geum rivale, Veronica chamaedrys</i>
Богатовлажнотравная	<i>Geum rivale, Urtica dioica, Angelica sylvestris, Galeobdolon luteum</i>
Влажнотравно-(неморально)-бореальная	<i>Galeobdolon luteum, Oxalis acetosella, Athyrium filix-femina, Solidago virgaurea, Equisetum sylvaticum, Stellaria holostea, Angelica sylvestris</i>
Влажнотравная и болотная (олиготрофный)	<i>Vaccinium vitis-idaea, Eriophorum vaginatum, Scheuchzeria palustris, Andromeda polifolia, Drosera rotundifolia, Chamaedaphne calyculata</i>
Влажнотравная и болотная (мезотрофный)	<i>Eriophorum vaginatum, Andromeda polifolia, Melampyrum pratense, Oxycoccus palustris, Chamaedaphne calyculata</i>
Бореально-влажнотравная	<i>Mercurialis perennis, Oxalis acetosella, Filipendula ulmaria, Maianthemum bifolium, Solidago virgaurea, Aegopodium podagraria</i>
Богатовлажнотравно-неморальная	<i>Mercurialis perennis, Galium odoratum, Urtica dioica, Asarum europaeum</i>

Неморальная	<i>Stellaria holostea, Aegopodium podagraria, Hepatica nobilis, Pulmonaria obscura, Galeobdolon luteum</i>
Луговая	<i>Hypericum perforatum, Rumex acetosella, Trifolium pratense, Veronica chamaedrys, Anthoxanthum odoratum</i>
Луговая (богатовлажнотравная)	<i>Geum rivale, Anthriscus sylvestris, Dactylis glomerata, Ranunculus acris, Luzula multiflora, Potentilla erecta, Urtica dioica, Ranunculus acris, Alchemilla vulgaris, Festuca pratensis</i>

Описание почвы.

Для описания почв и почвообразующих пород выкапывалась прикопка глубиной 30-60 см, далее выполнялось бурение буром Eijkelkamp до глубины 135 см, для болот и опорных геоморфологических точек бурение выполнялось до больших глубин. Для каждого генетического горизонта измерялась его мощность, определялся гранулометрический состав, цвет по шкале Манселла, отмечалось наличие или отсутствие оглеения, Fe-Mn конкреций, проверялась реакция с HCl и т.д. В таблице 3.9 представлены характеристики почвы, использованные в работе.

Таблица 3.9 Характеристики почвы, использованные в работе

1. Мощность	почвенных генетических горизонтов и почвы в целом
	Покровных отложений
	Суммарная органики
2. Целое число почвенных генетических горизонтов	
3. гранулометрический состав горизонтов	
4. глубина оглеения	

5. наличие новообразований
6. цвет горизонтов почвы по Манселлу
7. глубина вскипаемости (реакции с HCl)
8. глубина Fe, Mn конкреций

Итак, в общей сложности в работе использованы данные 3186 описаний растительности и 2358 почвенных.

3.3 Морфометрические параметры рельефа на разных иерархических уровнях

Рельеф как перераспределитель тепла и влаги – один из важнейших факторов функционирования и динамики ландшафта. Он прямо или опосредовано влияет на протекание как природных, так и социальных процессов (Райс, 1980, Симонов, 1998, Сысуев, 2003, 2004, Сысуев, Шарый, 2000). Определяет условия для произрастания растительности, тем самым влияет на территориальное размещение биоценозов. В условиях заболоченного южно-таежного ландшафта, перераспределение влаги играет огромную роль в закономерной смене различных типов ельников (Байбар и др., 2019). А перераспределение приходящей солнечной радиации влияет на конфигурацию тепловых полей территории, образуя температурные градиенты между ними (Пузаченко и др., 2019).

Для территории исследования была построена цифровая модель рельефа, полученная на основе топографической карты масштаба 1:10 000 (сечение горизонталей 2,5 метра). Оцифровка горизонталей производилась коллективом под руководством Ю.Г. Пузаченко. Дальнейшее построение ЦМР проходило в программе Erdas Imagine, был использован метод нелинейной интерполяции. Для удобства сопоставления данных ЦМР и сцен Landsat все данные приведены к единому пространственному разрешению (элементарная ячейка территории составляет 30 x 30 метров).

Иерархия рельефа.

Существуют некоторые правила, которые определяют смену различных форм рельефа в пространстве. Они могут быть исследованы в различных масштабах. Как правило, принято выделять нано-, микро-, мезо-, макро- и мегарельеф. Однако, такое деление весьма условно и данная градация может быть более дробной. Например, В. Бейкер выделял 10 иерархических уровней рельефа, связывая их с генезисом (Baker, 1986). Боча, Краснов (1958), Рюмин (1958) выделяли более 10 иерархических рангов рельефа, однако не было четких критериев их выделения (Невский, 2009). Вопросами иерархии в природе и в рельефе, в частности, занимался Ю.Г. Пузаченко, в своих работах он показал, что иерархию рельефа можно оценить количественно (Пузаченко, 1986, Пузаченко и др., 2002).

Рельеф территории формируется под действием процессов различного масштаба: от глобальных эндогенных процессов (тектонические движения) до локальных экзогенных (Wu, Qi, 2000). При этом, действует правило, чем больше пространственный интервал наблюдений, тем больше амплитуда высот (Васильев, 1992; Turcotte, 1997; Пузаченко, 1997б, 1999, 2004; Пузаченко и др., 2002, 2004б; Котлов, Пузаченко, 2006; Шредер, 2001; Буданов, 1999). Для всех рельефообразующих процессов характерно свойство самоподобия. Рельеф территории представляет из себя «матрешку», где формы рельефа меньшего порядка подобны формам более высокого ранга. При этом иерархические уровни дискретны, на границах между ними скачкообразный переход. Таким образом, рельеф обладает таким свойством как фрактальность (Mandelbort, 1975, 1977, 1982, Мандельброт, 2002). Принято выделять три типа фрактальной размерности: бурый шум ($n-0.5$, где n – целочисленная размерность), розовый шум ($> n-0.5$, но $< n$), черный шум ($> n-1$, но $< n-0.5$). Примером бурого шума могут быть структуры, полученные при формировании речной сети, черного шума – блочные структуры, система пологих холмов различного масштаба; розового шума – структуры с большой локальной амплитудой, частая смена положительных и отрицательных форм

рельефа (Пузаченко, 1997). При этом, рельеф может быть результатом наложения различных фрактальных процессов.

Рельеф территории – это результат наложения нескольких процессов с различной начальной частотой возбуждения (Пузаченко, 1986). От характера взаимодействия волн, вступают они в резонанс или диссонанс, зависит выраженность иерархии. Если иерархическая структура выражена слабо, то структура поверхности будет близка к чисто фрактальной и наоборот.

Рядом ученых показано, что информацию о структуре рельефа, количестве параметров порядка, ее формирующих, и непосредственно выделение иерархических уровней рельефа возможно при использовании спектрального анализа в сочетании с дополнительными методами (Turcotte, 1997; Марпл-мл, 1990; Пузаченко, 1997б, 1999, 2004; Пузаченко и др., 2002, 2004б; Котлов, Пузаченко, 2006). Так же пространственные или временные связи внутри одного объекта можно выявлять на основе вейвлет анализа и анализа вариограмм (Добеши, 2001). Несмотря на то, что у спектрального анализа на основе преобразования Фурье имеются некоторые допущения, с его помощью можно достаточно полно отразить строение территории исследования. Если на исследуемой поверхности присутствуют резкие перегибы, то происходит нарушение непрерывности функции и такие структуры будут описаны высокочастотными волнами большей амплитуды. Исключение волн с частотой 0,5 для дальнейшего анализа возможно при помощи метода сезонного сглаживания спектра (Кендалл, Стьюарт, 1976).

Для выявления иерархической организации рельефа выполняется расчет обобщенного двумерного спектра (Turcotte, 1997; Пузаченко, 1997б, 1999, 2004; Пузаченко и др., 2002, 2004б; Котлов, Пузаченко, 2006), который отражает значения спектральной плотности для одних и тех же частот по оси абсцисс и ординат при их суммировании по левой и правой диагонали спектра (авторская программа Fracdim Пузаченко, Алещенко). Далее выполняется оценка параметров регрессии «логарифм плотности спектра (SP) – логарифм частоты спектра (w)»):

$$\text{Log (Спектральная плотность)} = \alpha - \beta \cdot \log(w)$$

и рассчитывается фрактальной размерности (D):

$$D = (7 - \beta) / 2.$$

Далее в программе STATISTICA анализируются остатки от регрессии, производится сглаживание колебаний, связанных с тем, что высоты рельефа представлены дискретно. При анализе спектра остатков от регрессии необходимо учитывать возможную смену фрактальной размерности. Если остатки описываются полиномом с ярко выраженными перегибами, то максимальные значения полинома отражают периоды, на которых произошла смена фрактальной размерности. Таким образом, наличие нескольких разномасштабных рельефообразующих процессов может быть диагностировано, если параметр, определяющий фрактальную размерность на участке, будет статистически достоверен и отличаться для всего спектра.

После исключения полиномиального тренда у остатков регрессии проверяется наличие периодической составляющей. Если она присутствует, то можно утверждать, что в рельефе существуют волны, частоты которых связаны как:

$$w_n = w_0 n,$$

где n – целое число, которое соответствует иерархическому уровню или номеру волны. Так, существуют уровни с периодами $1/w_0$, $1/2w_0$, $1/3w_0$ и т.д. Так, волны в рельефе – это результат действия фактора, порождающего каскад самоподобных структур, при этом, чем выше иерархический уровень, тем больше их период и меньше номер волны. Данный вид спектра типичен для многих нелинейных автоколебательных процессов (Буданов, 1999, Васильев, 1992).

Таким образом, для квадрата со сторонами 15 км, расположенного в центральной части территории исследования выполнен спектральный анализ в программе Fracdim. Дальнейший анализ спектра был выполнен в программе STATISTICA, а именно, исключена высокочастотная составляющая при

помощи частотной фильтрации, выполнена авторегрессия для выявления периодических составляющих и проанализирован спектр остатков регрессии.

Согласно геоморфологической классификации на территории исследования можно выделить 9 иерархических уровней (Таблица 3.10), два из которых соответствует микрорельефу и семь – мезорельефу (Рычагов, 2006). На уровне мезорельефа первого, второго и третьего порядка отчетливо выделяются крупные блоки - моренные гряды и озерные котловины, на уровне мезорельефа четвертого и пятого порядка – долины крупных рек (р. Межа, р. Тотьма, р. Ночная), на шестом и седьмом порядке мезорельефа появляются такие реки как Тудовка и Ночна. На уровне микрорельефа прослеживается сложная сеть речек и ручейков (Рисунок 3.3).

Таблица 3.10 Иерархические уровни рельефа

Уровень	Название	Характерные линейные размеры, м
Мезорельеф	Мезорельеф первого порядка (R127)	3810
	Мезорельеф второго порядка (R81)	2430
	Мезорельеф третьего порядка (R55)	1650
	Мезорельеф четвёртого порядка (R43)	1290
	Мезорельеф пятого порядка (R35)	1050
	Мезорельеф шестого порядка (R15)	450
	Мезорельеф седьмого порядка (R9)	270
Микрорельеф	Микрорельеф (R5)	150
	Микрорельеф (R)	30

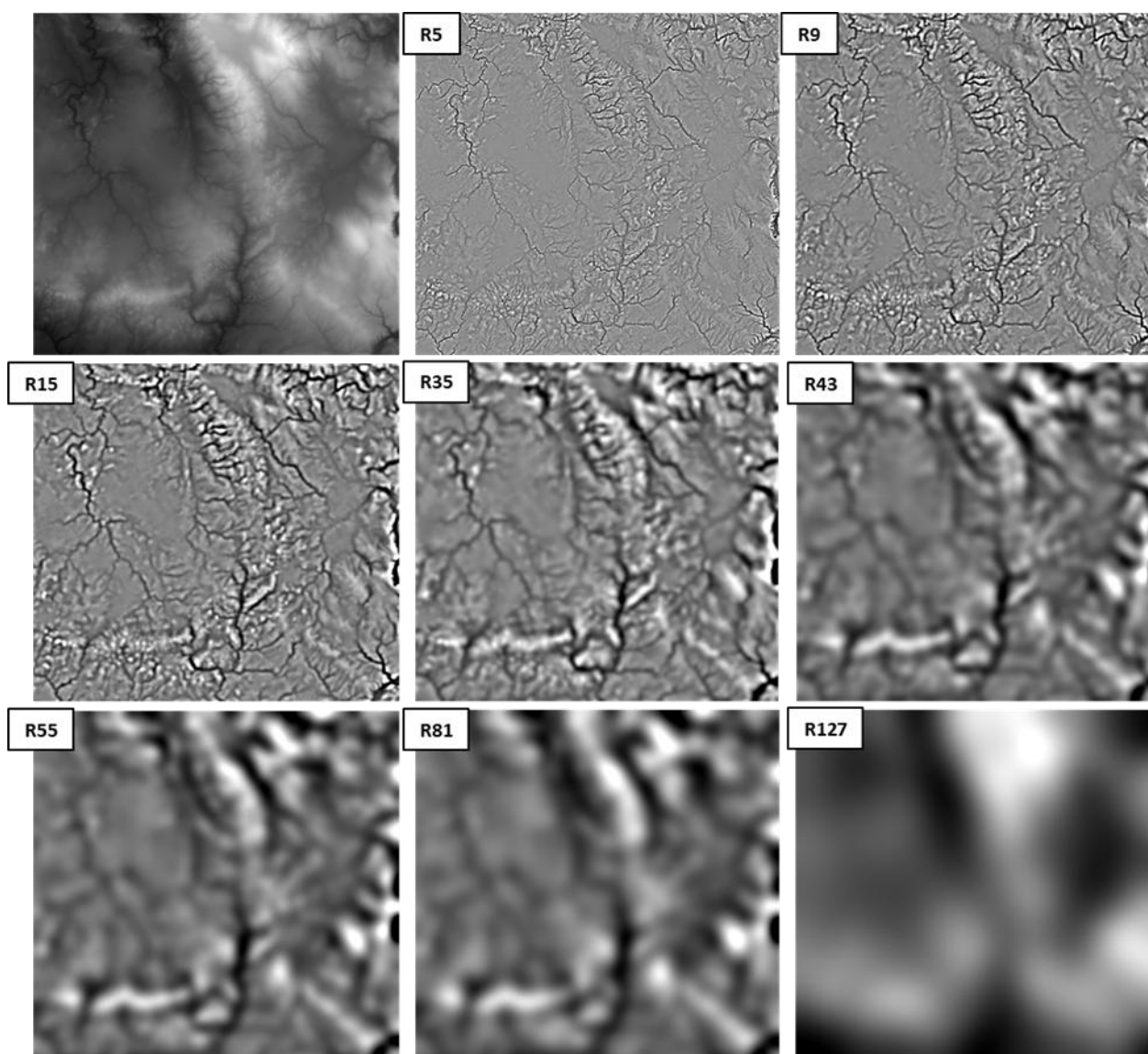


Рисунок 3.3 Иерархические уровни организации рельефа и исходная цифровая модель рельефа

Морфометрические параметры рельефа. Итак, на основе спектрального анализа была выделена иерархическая организация рельефа территории исследования. Для каждого уровня в программе ImageJ был применен пропускной фильтр, с помощью которого были рассчитаны относительные высоты на основе обратного преобразования Фурье. Как было сказано в Главе 1, на сегодняшний день существует большое разнообразие пакетов программного обеспечения для расчета морфометрики рельефа (Сысуев, 1986; Сысуев, Шарый, 2000; Шарая, Шарый, 2003; Lecours et al, 2017), однако в данной работе набор морфометрических параметров был рассчитаны в программе ENVI 4.5. В таблице 3.11 представлен список

основных морфометрических параметров, использованных в работе (Joseph, 1996).

Таблица 3.11 Морфометрические параметры, использованные в работе

Морфометрический параметр
1. Крутизна
2. Лапласиан (оператор Лапласа)
3. Освещенность с востока
4. Освещенность с юга
5. Плановая выпуклость
6. Профильная выпуклость
7. Поперечная (кросс-секционная) кривизна
8. Максимальная кривизна рельефа
9. Максимальная кривизна рельефа
10. Продольная кривизна

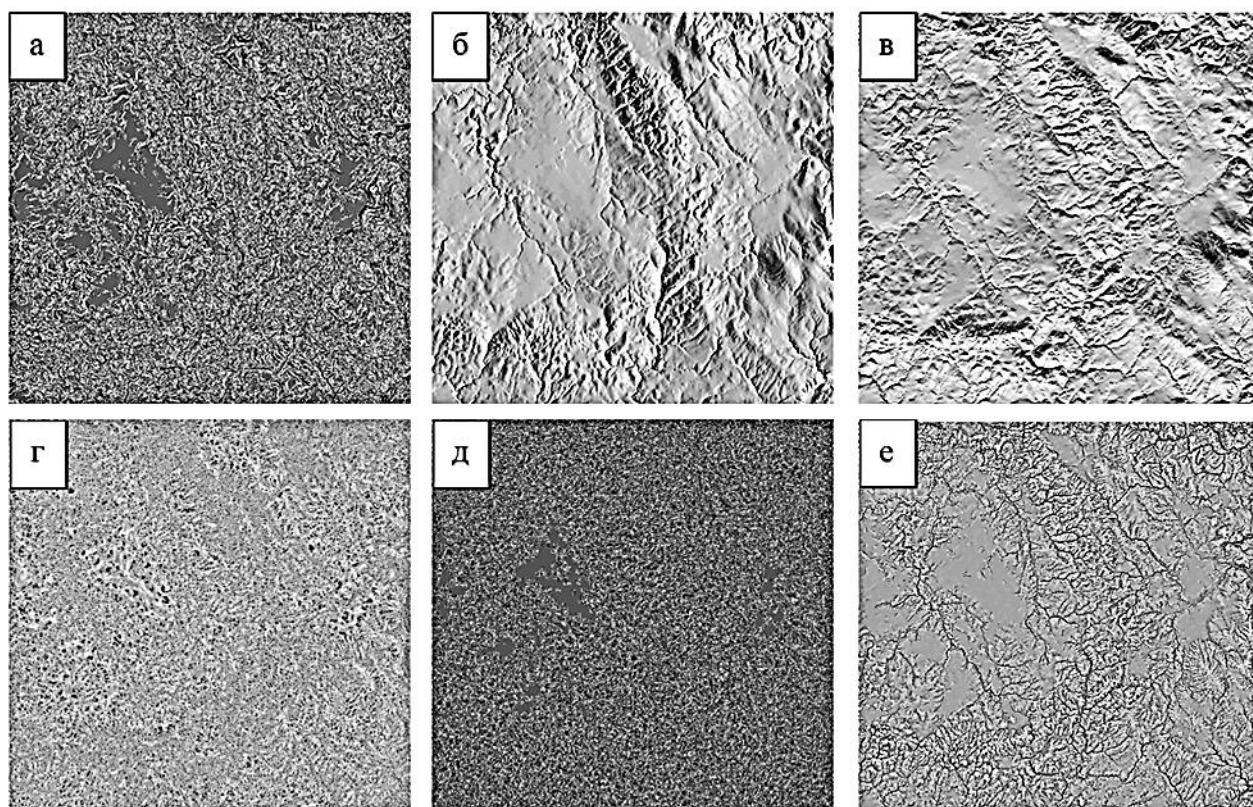


Рисунок 3.4 Основные морфометрические характеристики микрорельефа (с линейными размерами 150 метров): а – профильная кривизна, б – освещенность с востока, в – освещенность с юга, г – максимальная кривизна, д – плановая кривизна, е - выпуклость

На рисунке 3.4 приведены примеры морфометрических характеристик на уровне микрорельефа. В общей сложности, мы получили 90 переменных (9 иерархических уровней по 10 параметров), характеризующие рельеф территории исследования.

3.4 Общая схема анализа данных

Основной метод, использованный в работе, - метод главных компонент (Хакен, 2001), с его помощью можно выделить ортогональные, взаимонезависимые отображения множества измерений через виртуальные факторы или главные компоненты. В предлагаемом подходе параметры порядка отражают стационарное неизменное во времени состояние системы и, следовательно, тождественны инвариантам для рассматриваемого временного интервала.

Согласно рисунку 3.5 и 3.6 расчет инвариантов – последовательное постепенное обобщение методом главных компонент.

Первый этап – расчет инвариантов отражения отображения (мультиспектральных данных Landsat). На первом этапе методом главных компонент обобщаются основные каналы сцен Landsat (синий, зеленый, красный, ближний инфракрасный и 2 коротковолновых инфракрасных канала). В результате, для каждого бесснежного срока наблюдения выделяются 3 компоненты, для зимы – 2 компоненты, отражающие яркость или количество биомассы, фотосинтез (активность протекания фотосинтеза) и влажность. Анализ зарубежной литературы показал, что 3 компоненты также выделяются и для других территорий исследования (Ingebritsen, Lyon, 1985; Patterson, Yool, 1998; Campbell, Congalton, 2012; Baig et al, 2014). Далее отдельно обобщаются яркостные инварианты всех сроков, все инварианты фотосинтеза и все инварианты влажности, результат – частные инварианты. Обобщение частных инвариантов позволяет получить интегральные инварианты (инварианты отражения), отражающие которые отражают устойчивые особенности функционирования геосистем, связанные, в первую

очередь, с соотношением тепла и влаги (Рисунок 3.5). Так как временной ряд длинноволновых данных Landsat короче мультиспектральных, присутствует периодический шум, связанный с ошибками съемочной системы у сцен Landsat 4-5 и Landsat 8 после 2019 года, тепловые каналы анализировались отдельно по той же методике и использовались сугубо для верификации инвариантов по МДЗ.

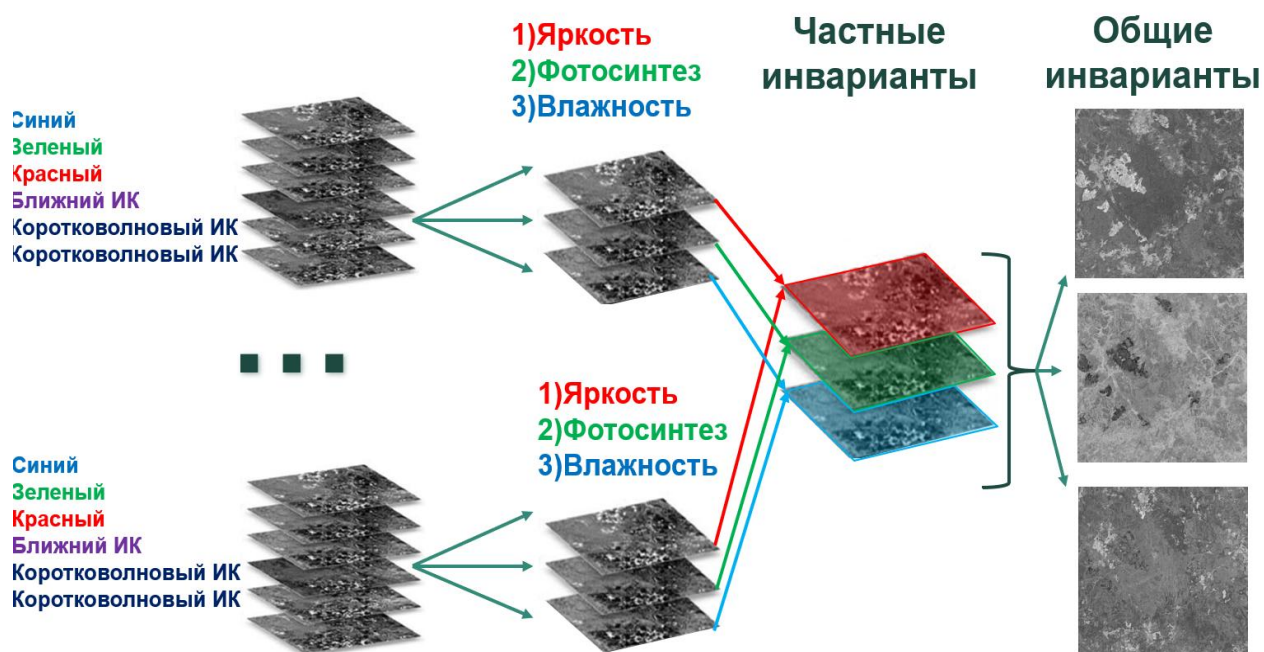


Рисунок 3.5 Схема получения интегральных инвариантов на основе мультиспектральных дистанционных данных

Второй этап – расчет параметров порядка рельефа. Все морфометрические параметры рельефа на разных иерархических уровнях обобщаются методом главных компонент в программе STATISTICA 12. Методом каменной осыпи выявляется размерность всех характеристик рельефа. Таким образом, мы можем избавиться от информационной избыточности, сжать массив данных о рельефе без значительных потерь информации.

Третий этап - интеграция инвариантов отражения с параметрами порядка рельефа для получения ландшафтных инвариантов на основе МДЗ и ЦМР (Рисунок 8.4). Выполняется верификация полученных ландшафтных

инвариантов на основе полевых данных статистическими методами: мультирегрессионный анализ и дискриминантный анализ.

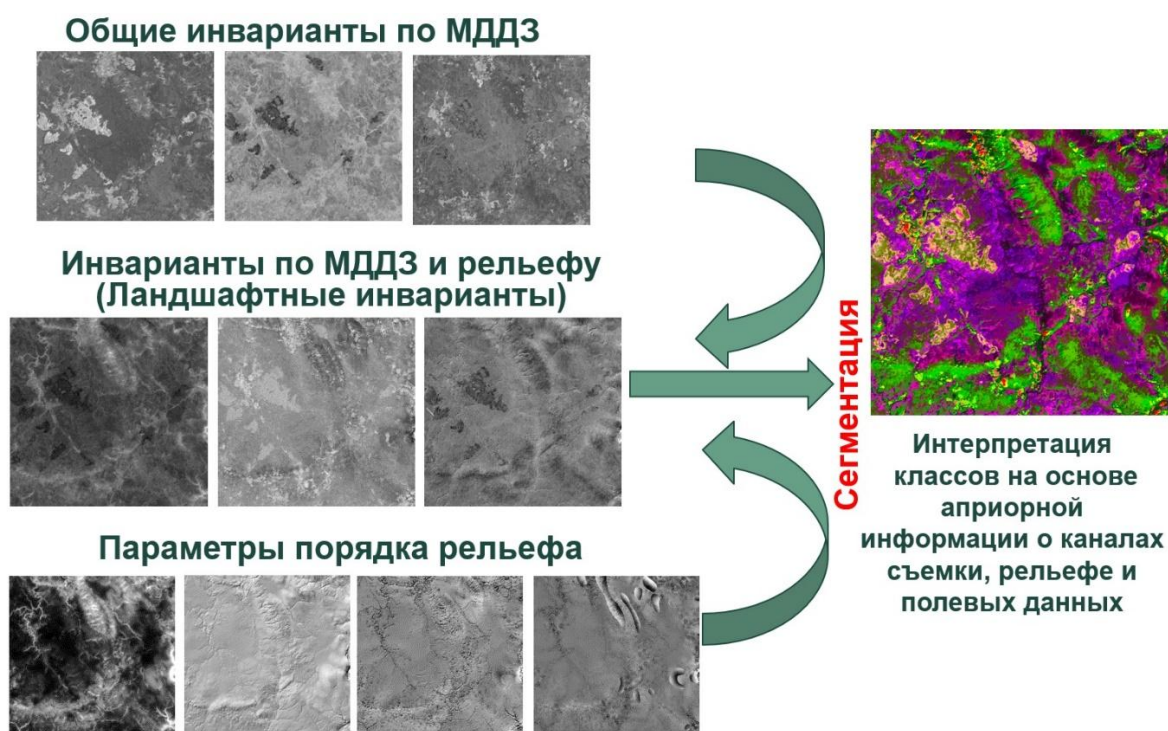


Рисунок 3.6 Схема получения карты устойчивых биогеофизических состояний на основе интегральных инвариантов, параметров порядка рельефа и полевых данных

Четвертый этап – получение карты инвариантах устойчивых биогеофизических состояний ландшафтов для Центрально-Лесного заповедника и прилегающей территории. Выполняется дихотомическая классификация ландшафтных инвариантов по метрике Евклида в программе Fracdim. Так как при данной классификации происходит постоянное деление на 2, можно отследить семантику получаемых классов. Малые классы, приуроченные к зарастающим с/х землям, залежам и лугам и имеющие площадь менее 0,1% от всей территории исследования, объединяются с ближайшими. Оценка качества классификации проводится при помощи пошагового дискриминантного анализа от геоботанических (3186) и почвенных (2358) описаний, а также от априорной информации о всех каналах съемки, включая тепловые.

Для составления легенды были отобраны наиболее информативные показатели рельефа, растительности, почвы, и температура приземного слоя атмосферы по длинноволновым данным снимков Landsat. При помощи дисперсионного анализа рассчитаны средние значения на класс.

Для показателей рельефа составлена количественная легенда со средними значениями морфометрических показателей, которые вносят наибольший вклад в описание структуры инвариантов (Байбар и др., 2019). Для удобства на основе гистограмм распределения значений переменных были выбраны градации каждого показателя с учетом физико-географических условий территории исследования (Таблица 3.12).

Таблица 3.12 Характеристики рельефа, используемые для легенды.

Примечание – показатели в градации даны средние на класс

Показатель	Градации
Абсолютная высота, м	Относительно низко (<255) Средняя высота (255 – 270) Относительно высоко (>270)
Крутизна склонов, гр.	Очень плоско (<0.5) Плоско (0,5 – 1,5) Среднеплоско (1,5 – 2,5) Относительно круто (>2.5)
Освещенность с Ю	Преимущественно Ю экспозиция (>0.71) Преимущественно С экспозиция (<0.71)
Минимальная кривизна	Плоско (>-0.01) Слабовогнутый (-0.02 – (-0.01)) Вогнутый (<-0.02)
Максимальная кривизна	Плоско (<0.01) Слабовыпуклый (0,01 – 0,03) Выпуклый (>0.03)
Освещенность с В для иерархического уровня с линейными размерами 1050 метров	Преимущественно З экспозиция (<0.707) Преимущественно В экспозиция (>0.707)
Минимальная кривизна для иерархического уровня с линейными размерами 1290 метров	Плоско (<-0.25) Слабовогнутый (-0.25 – (-0.15)) Вогнутый (>-0.15)
Максимальная кривизна для иерархического уровня с	Плоско (<0.01) Слабовыпуклый (0,01 – 0,018)

линейными размерами 1290 метров	Выпуклый (>0.018)
Крутизна склонов для иерархического уровня с линейными размерами 1650 метров	Очень плоско (<0.2) Плоско ($0.2-0.5$) С небольшим уклоном (>0.5)
Крутизна склонов для иерархического уровня с линейными размерами 2430 метров	Очень плоско (<0.3) Плоско ($0.3 - 0.6$) С небольшим уклоном (>0.6)
Освещенность с Ю для иерархического уровня с линейными размерами 2430 метров	Преимущественно Ю экспозиция (<0.707) Преимущественно С экспозиция (>0.707)
Освещенность с В для иерархического уровня с линейными размерами 2430 метров	Преимущественно З экспозиция (<0.7065) Преимущественно В экспозиция (>0.7065)
Максимальная кривизна для иерархического уровня с линейными размерами 2430 метров	Плоско (<0.01) Слабовыпуклый ($0.01 - 0.02$) Выпуклый (>0.02)
Минимальная кривизна для иерархического уровня с линейными размерами 2430 метров	Плоско (<-0.02) Слабовогнутый ($-0.02 - (-0.01)$) Вогнутый (>-0.01)

Аналогичная легенда была выполнена на основе инвариантов тепловых полей, приведенных к температурам самого теплого (14.08.2010) и холодного срока наблюдения (06.02.2017). Для каждого класса рассчитывалась средняя температура в зимнее и летнее время (Таблица 3.13).

Таблица 3.13 Градация температуры приземного слоя атмосферы, использованная для легенды

Примечание – показатели в градации даны средние на класс

Показатель	Градации
Температура зимой, град. С	Очень холодно (<-16.5) Холодно ($-16.5 - (-15.5)$) Тепло (>-15.5)
Температура летом, град. С	Прохладно (<21.5) Тепло ($21.5 - 23.5$) Очень тепло (>23.5)

В основу составления легенды растительности и почвы легли как средние показатели на класс, так и качественная информация, полученная при анализе распределения значений основных характеристик (Таблица 3.14, 3.15).

Таблица 3.14 Характеристики растительности, используемые для легенды
Примечание – показатели в градации даны средние на класс

Показатель	Градации	Показатель	Градации
Древесный ярус			
Высота древостоя	Невысокие (0 - 15 м) Средневысокие (15 – 25) Высокие (>25 м)	Сомкнутость древостоя	Слабосомкнутые (0 – 0,3) Среднесомкнутые (0,3 – 0,5) Сильносомкнутые (>0.5)
СПС	Слабополнотные (0 – 10) Среднеполнотные (10 – 20) Высокополнотные (>20)	СПС Сосна	Отсутствует (0) Мало (0 – 3) Средне (3 -6) Много (>6)
СПС Ель	Отсутствует (0) Мало (0 – 6) Средне (6 - 12) Много (>12)	СПС Береза	Отсутствует (0) Мало (0 – 3) Средне (3 -7) Много (>7)
СПС Осина	Отсутствует (0) Мало (0 – 2) Средне (2 -4) Много (>4)	СПС Ольха серая	Отсутствует (0) Мало (0 – 2) Средне (2 -4) Много (>4)
СПС Ольха черная	Отсутствует (0) Мало (0 – 0.5) Средне (0.5 – 1.5) Много (> 1.5)	СПС Рябина	Отсутствует (0) Мало (0 – 0.6) Средне (0.6 – 1.2) Много (> 1.2)
СПС Ива	Отсутствует (0) Мало (0 – 0.3) Средне (0.3 – 0.7) Много (> 0.7)	СПС Клен	Отсутствует (0) Мало (0 – 0.6) Средне (0.6 – 1.2) Много (> 1.2)
СПС Липа	Отсутствует (0) Мало (0 – 0.4)	СПС Вяз	Отсутствует (0) Мало (0 – 0.5)

	Средне (0.4 – 1.2) Много (> 1.2)		Средне (0.5 – 2) Много (> 2)
ПП подроста и подлеска	Отсутствует (0) Мало (0 – 10%) Средне (10% - 20%) Много (>20%)		
Травяно-кустарничковый ярус			
ПП травянистог о яруса	Отсутствует (0) Мало (30% - 50%) Средне (50% - 80%) Много (>80%)		
Моховой ярус			
ПП мохового яруса	Отсутствует (0) Очень мало (0 – 20%) Мало (20% - 50%) Средне (50% - 80%) Много (>80%)	ПП сфагнума	Отсутствует (0) Очень мало (0 – 20%) Мало (20% - 50%) Средне (50% - 80%) Много (>80%)
ПП долгомош- ников	Отсутствует (0) Мало (0 – 5%) Средне (>5%)	ПП зеленомош- ников	Отсутствует (0) Мало (0 – 4%) Средне (4% -10%) Много (>10%)

Таблица 3.15 Характеристики почвы, использованные для легенды
Примечание – показатели в градации даны средние на класс

Мощность почвы	Маломощная (0-60 см) Среднемощная (60-80 см) Мощная (>80 см)
Количество почвенных горизонтов	Просто устроенная почва (1-4 горизонтов) Почва средней сложности (5-8 горизонтов) Сложноустроенная почва (>8 горизонтов)
Глубина вскипаемости	Вскипает с поверхности Вскипает на незначительной глубине (0-100 см) Вскипает в нижней части почвенного профиля (>100 см)
Глубина Fe, Mn конкреций	В верхней части почвенного профиля (0-20) В средней части почвенного профиля (20-40) В нижней части почвенного профиля (>40)
Верхняя граница оглеения	В верхней части почвенного профиля (0-50) В средней части почвенного профиля (50-100) В нижней части почвенного профиля (>100)

МОЩНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТОВ	
A1	Слабодерновый (0-10 см) Среднедерновый (10-20 см) Грубодерновый (>20 см)
A1A2	Маломощный переходный горизонт (0-3 см) Среднемощный переходный горизонт (3-6 см) Мощный переходный горизонт (>6 см)
A2	Слабоподзолистый (0-10 см) Среднеподзолистый (10-20 см) Сильноподзолистый (>20 см)
A2B	Маломощный переходный горизонт (0-5 см) Среднемощный переходный горизонт (5-15 см) Мощный переходный горизонт (>15 см)
B	Маломощный (0-20 см) Среднемощный (20-40 см) Мощный (>40 см)
ЦВЕТ ПО ШКАЛЕ МАНСЕЛЛА	
Hue (Цветовой тон)	YR желто-красный (2.5 YR - 5 YR - 7.5 YR - 10 YR), чем меньше цифра, тем больше преобладает красный оттенок)
	Y желтый (2.5Y, 5Y), чем меньше цифра, тем больше преобладает желтый оттенок)
	GY зелено-желтый (5GY, 10GY), чем меньше цифра, тем больше преобладает зеленый оттенок)
	B голубой (5B, 10B) чем меньше цифра, тем больше преобладает голубой оттенок)
	BG голубовато-зеленый (5BG, 10BG) чем меньше цифра, тем больше преобладает голубой оттенок)
	G зеленый (5G, 10G) чем меньше цифра, тем больше преобладает голубой оттенок)
Value (Светлота)	Светлые – темные (1 - черный, 8 – светлый, близкий к белому)
Chroma (Насыщенность)	Слабонасыщенные (пастельные тона) – сильно насыщенные (яркие тона)

Таким образом, на рисунке 3.7 представлена схема диссертационного исследования.

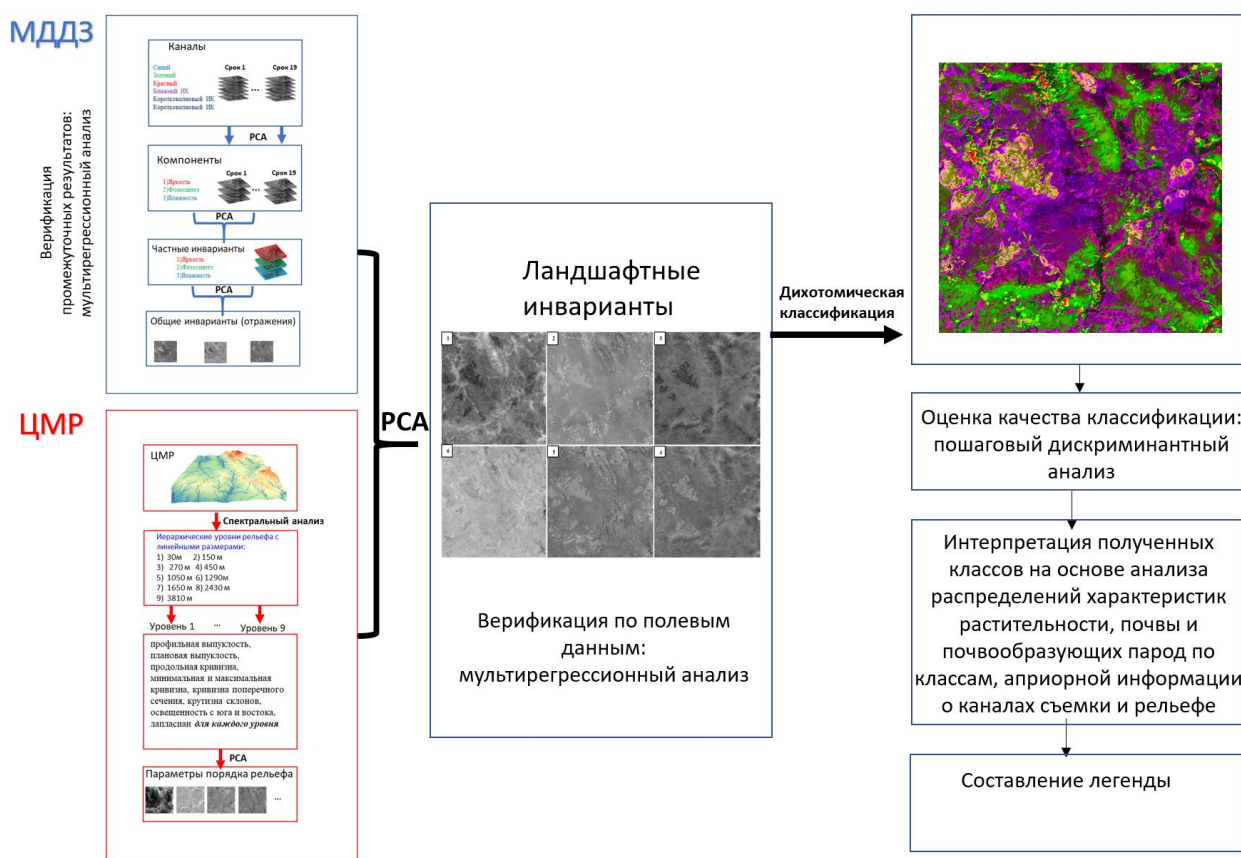


Рисунок 3.7 Схема диссертационного исследования

Глава 4. Результаты

4.1 Инварианты мультиспектральных данных дистанционного зондирования²

Инварианты мультиспектральных данных дистанционного зондирования были получены благодаря последовательному обобщению данных основных каналов сцен Landsat. Так, методом главных компонент выполнено обобщение 6 каналов для каждого срока съемки (Таблица 4.1). Для снежного периода (февраль-март) выделяется две компоненты для всех каналов: первая – общая яркость всех каналов, вторая - яркость в коротковолновых ИК каналах. Для бесснежного периода выделяется 3 компоненты снимка: первая - общая яркость всех каналов, вторая и третья - яркость в ближнем ИК и в коротковолновых ИК каналах, однако их вклад в описание варьирования различается в зависимости от сезона года. Для первой-второй декады апреля характерен высокий вклад в описание варьирования каналов съемки яркости коротковолновых ИК каналов, относительно ближнего ИК канала. В конце апреля-мае, начинает преобладать в описании варьирования отражение в ближнем ИК канале, относительно коротковолновых ИК каналов, а в июне эта тенденция усиливается. В конце сентября вклад в описание всех каналов становится практически равным для средних ИК и ближнего ИК канала.

Таблица 4.1 Результаты интеграции основных каналов сцены

Дата съемки (дд/мм/гг)	Компоненты снимков (доля описания общего варьирования)			Общая доля описания
	Общая яркость всех каналов	Яркость ближнего ИК канала	Яркость коротковолновых ИК каналов	
04/02/87	0.74	0	0.20	0.94
06/06/88	0.76	0.19	0.03	0.98
03/05/90	0.89	0.08	0.02	0.99

² Подглава 4.1 частично опубликована в статье Ландшафтные инварианты – параметры порядка динамической системы / А.С. Байбар, М. Ю. Пузаченко, Р. Б. Сандлерский, А. Н. Кренке // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2023. — Т. 87, № 3. — С. 370–390

27/04/00	0.88	0.08	0.03	0.99
27/09/00	0.80	0.08	0.07	0.95
22/03/01	0.96	0	0.03	0.99
10/04/02	0.63	0.03	0.32	0.98
20/06/02	0.80	0.16	0.02	0.98
11/02/07	0.96	0	0.03	0.99
03/06/07	0.75	0.17	0.04	0.96
17/02/15	0.68	0	0.31	0.99
23/03/16	0.93	0	0.06	0.99
06/02/17	0.85	0	0.13	0.98
14/04/18	0.67	0.07	0.26	1
17/04/19	0.79	0.08	0.12	0.99
04/06/19	0.79	0.17	0.03	0.99
26/09/20	0.83	0.08	0.06	0.97
17/02/21	0.95	0	0.05	1
24/03/22	0.86	0	0.14	1

Таким образом, исходя из общей физической интерпретации каналов съемки, где общая яркость всех каналов отражает биомассу, ближний ИК канал чувствителен к содержанию хлорофилла и, соответственно, активности фотосинтеза, а коротковолновые ИК каналы слабее отражаются водой, относительно остальных, прослеживается сезонная смена состояний ландшафтного покрова, от покрытого снегом с отсутствием вегетации и различным влагосодержанием, определяемым погодными условиями конкретного года, через начало вегетации при активном таянии снега и высоком влагосодержании территории до летнего - с высокой вегетативной активностью растительного покрова при снижении влагосодержания территории и к паритету к концу сентября между вегетационной активностью и влагосодержанием, при их общем небольшом вкладе в описание варьирования всех каналов. В общем, 2-3 компоненты для шести каналов съемки Landsat, описывают от 94% до 100% варьирования всех каналов, что говорит об практическом отсутствии потери информации при снижении размерности снимка (Байбар и др., 2023).

На следующем этапе компоненты снимков обобщаются методом главных компонент по всем срокам согласно их связи с исходными каналами.

В анализе остаются те обобщённые компоненты, которые имеют высокие коэффициенты детерминации с большинством сроков съёмки, либо имеют сезонную составляющую и долю описания варьирования больше 1.

При интеграции компонентов общей яркости всех каналов (Таблица 4.2) получено, что первый частный инвариант положительно связан практически со всеми сроками съёмки максимальными коэффициентами детерминации (КД) и описывает 67% варьирования первой компоненты всех сроков съёмки (Рисунок 4.1).

Таблица 4.2 Результаты интеграции компоненты общей яркости

Дата (дд/мм/гг)	Интеграция компоненты общей яркости каналов	
	Частный инвариант (КД)	Вторая компонента (КД)
04/02/87	0.83338	-0.225769
06/06/88	0.76779	-0.351274
03/05/90	0.75210	-0.435782
27/04/00	0.80826	-0.425372
27/09/00	0.86436	-0.246900
22/03/01	0.89288	-0.147820
10/04/02	0.38077	-0.691145
20/06/02	0.82572	0.027413
11/02/07	0.92588	0.076060
03/06/07	0.84626	-0.040981
17/02/15	0.91723	0.267296
23/03/16	0.92830	0.215044
06/02/17	0.90709	0.296813
14/04/18	0.68339	-0.261085
17/04/19	0.84035	-0.033219
04/06/19	0.80442	0.352591
26/09/20	0.80018	0.225330
17/02/21	0.84226	0.429078
24/03/22	0.81234	0.426646
Описанное варьирование	12.80322	1.930207
Доля описания	0.67385	0.101590

Исключение составляет съемка 10 апреля 2002 года, которая в большей степени связана со второй компонентой, описывающей 10% общего варьирования. Таким образом, для компонент общей яркости выделяется один частный инвариант, описывающий интегральную яркость всех каналов съемки фактически за все сроки съемки, высокими значениями выделяющий территории с низкой надземной биомассой, и, соответственно, низкими – с высокой.

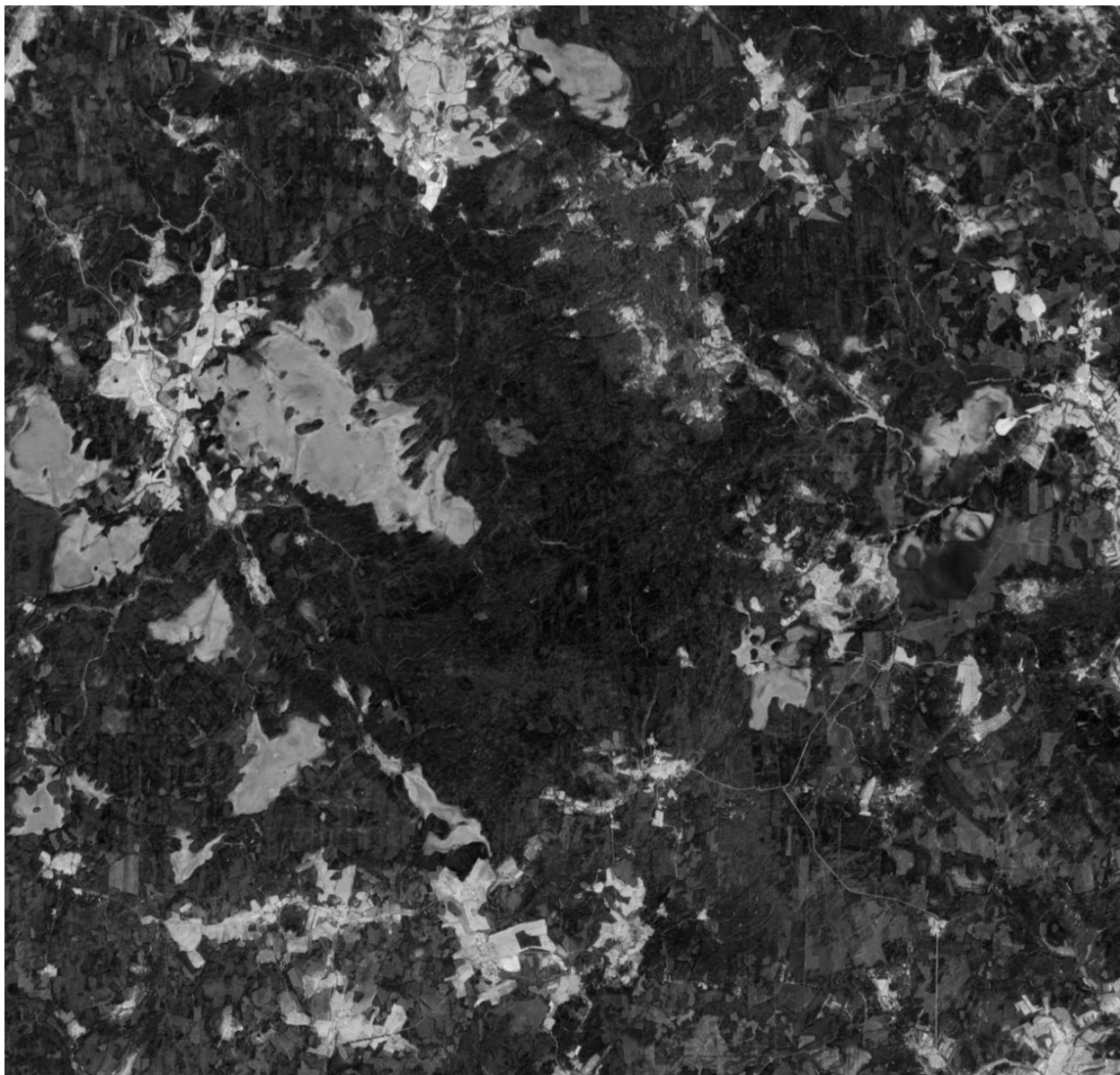


Рисунок 4.1 Инвариант яркости всех каналов

Интеграция компонент ближнего ИК канала для всех сроков съемки показала (Таблица 4.3), что первый частный инвариант положительно

определяется максимальными КД для снимков первой-второй декады апреля и 27 сентября 2000 года и отрицательно – для снимков июня, кроме 6 июня 1988 года, при описании 41% от общего варьирования компонент ближнего ИК канала (Рисунок 4.2). Второй частный инвариант имеет положительные КД со всеми сроками съемки при максимальных КД для снимков от 26 сентября 2020 года, 3 мая 1990 года, 27 апреля 2000 года и 6 июня 1988 года, при описании 23% общего варьирования. Третья компонента описывает 11% общего варьирования и практически не имеет значимых КД с компонентами ИК канала, доописывая с разными знаками варьирование ИК канала 26 сентября 2020 года и 3 мая 1990 года.

Таблица 4.3 Результаты интеграции компоненты ближнего ИК канала

Дата (дд/мм/гг)	Интеграция компоненты ближнего ИК канала		
	Частный сезонный инвариант (КД)	Частный инвариант (КД)	Третья компонента (КД)
06/06/88	-0.535859	0.558682	-0.341954
03/05/90	0.282146	0.586703	-0.546913
27/04/00	0.409405	0.579390	-0.409305
27/09/00	0.711403	0.390996	-0.096023
10/04/02	0.811353	0.304654	0.099092
20/06/02	-0.669391	0.577144	0.102948
03/06/07	-0.753309	0.457787	0.191870
14/04/18	0.797207	0.238260	0.299145
17/04/19	0.845519	0.225776	0.277709
04/06/19	-0.669977	0.513461	0.290207
26/09/20	0.110937	0.591795	0.551182
Описанное варьирован ие	4.525929	2.502002	1.204661
Доля описания	0.411448	0.227455	0.109515

Таким образом, для компонент ближнего ИК канала выделяется частный сезонный инвариант (Рисунок 4.2), определяющий положительными значениями высокую интенсивность вегетации, в первую очередь, в начале апреля и низкую летом и наоборот, отрицательными – высокую интенсивность

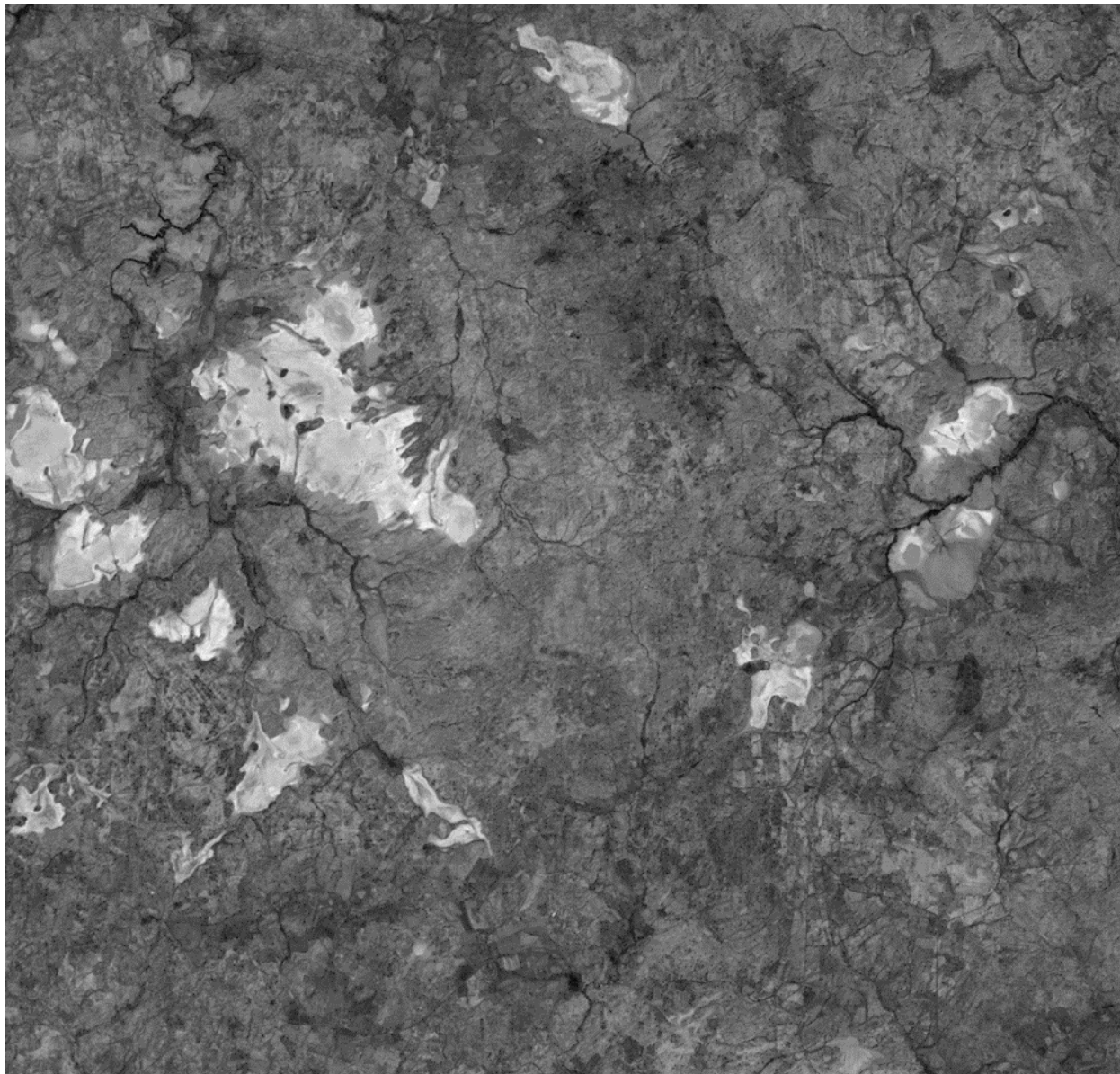


Рисунок 4.2 Сезонный инвариант ближнего ИК канала

вегетации летом и низкую в начале апреля, а также частный инвариант, положительно определяемый компонентами ближнего ИК канала за все сроки съемки, на нем в первую очередь выделяются молодые мелколиственные леса на моренных грядах (Рисунок 4.3). Совместно они описывают 64% общего варьирования ближнего ИК канала за все сроки съемки.

При интеграции компонент коротковолновых ИК каналов за все сроки съемки первый частный инвариант описывает 29% варьирования при значимых положительных КД практически со всеми сроками съемки, кроме первой-второй декады апреля, и их максимуме для сроков со снежным покровом (Таблица 4.4). Второй частный инвариант описывает 15% варьирования и максимально положительно связан с летними, а также бесснежными сроками съемки, за исключением первой-второй декады апреля, и отрицательно со всеми остальными сроками съемки. Третий частный инвариант описывает 11% варьирования и имеет максимальные положительные связи со снимками

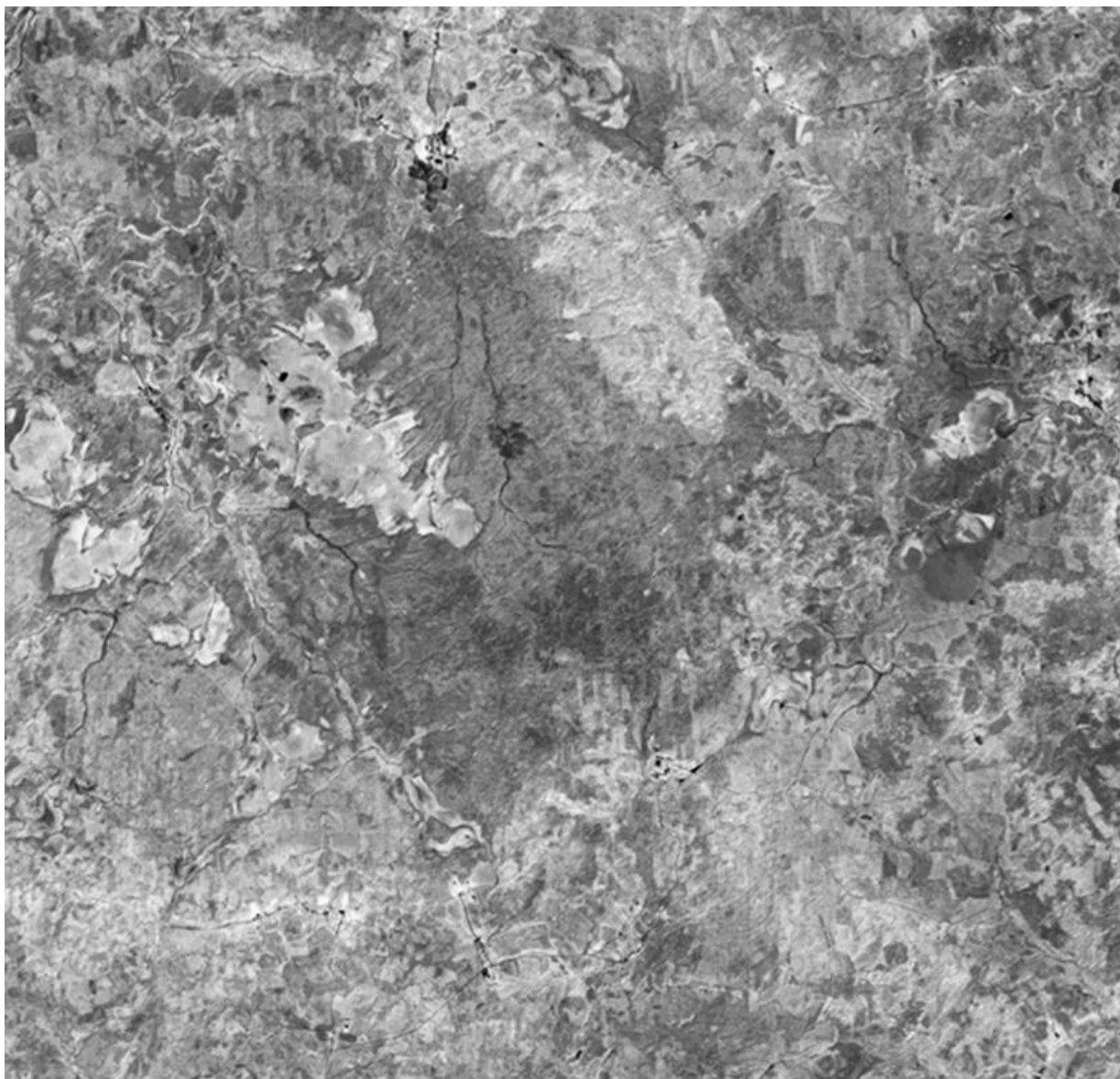


Рисунок 4.3 Инвариант ближнего ИК канала

первой-второй декады апреля, а также с 26 сентября 2020 года, с остальными сроками съемки значимых КД нет. Четвёртая компонента описывает 6% варьирования и имеет высокие положительные КД с 3 июня 2007 года, 20 июнем 2002 года и низкий отрицательный КД с 27 сентября 2000 года при отсутствии значимых КД с остальными сроками съемки.

Таблица 4.4 Результаты интеграции компоненты коротковолновых ИК каналов

Дата (дд/мм/гг)	Интеграция компоненты средних ИК каналов			
	Частный инвариант (КД)	Частный сезонный инвариант (КД)	Частный инвариант первой-второй декады апреля (КД)	Четвёртая компонента (КД)
04/02/87	0.520613	-0.122915	-0.318505	0.032925
06/06/88	0.333116	0.637648	0.041285	-0.174559
03/05/90	0.582115	0.419630	0.024473	-0.379727
27/04/00	0.506982	0.437316	0.161197	-0.288777
27/09/00	0.446577	0.298440	0.108856	-0.553506
22/03/01	0.568539	-0.311051	-0.188139	0.024423
10/04/02	-0.057494	-0.457748	0.704343	-0.074221
20/06/02	0.278043	0.453793	0.190542	0.426227
11/02/07	0.694392	-0.327500	-0.143224	-0.058889
03/06/07	0.397401	0.449149	0.139908	0.538646
17/02/15	0.857079	-0.278321	-0.089286	0.064766
23/03/16	0.818790	-0.157741	-0.182876	0.073121
06/02/17	0.831144	-0.243879	-0.121053	0.068639
14/04/18	-0.003864	-0.393397	0.789880	-0.031365
17/04/19	0.288102	-0.301763	0.665482	0.030906
04/06/19	0.433405	0.534643	0.243097	0.321615
26/09/20	0.418258	0.433313	0.450820	-0.044924
17/02/21	0.548845	-0.220755	-0.109029	0.030960
24/03/22	0.694933	-0.446638	0.071862	0.038514
Описанное варьирование	5.547042	2.828772	2.151703	1.170978
Доля описания	0.291950	0.148883	0.113248	0.061630

В результате, согласно принятым критериям, для компонент коротковолновых ИК каналов выделяются частный инвариант положительно

определяемый большинством компонент коротковолновых ИК каналов за все сроки съемки (Рисунок 4.4), кроме первой-второй декады апреля, и частный сезонный инвариант, высокими положительными значениями выделяющий слабо обводнённые территории, в первую очередь, летом при их относительно высоком обводнении в снежный период и наоборот, низкими отрицательными

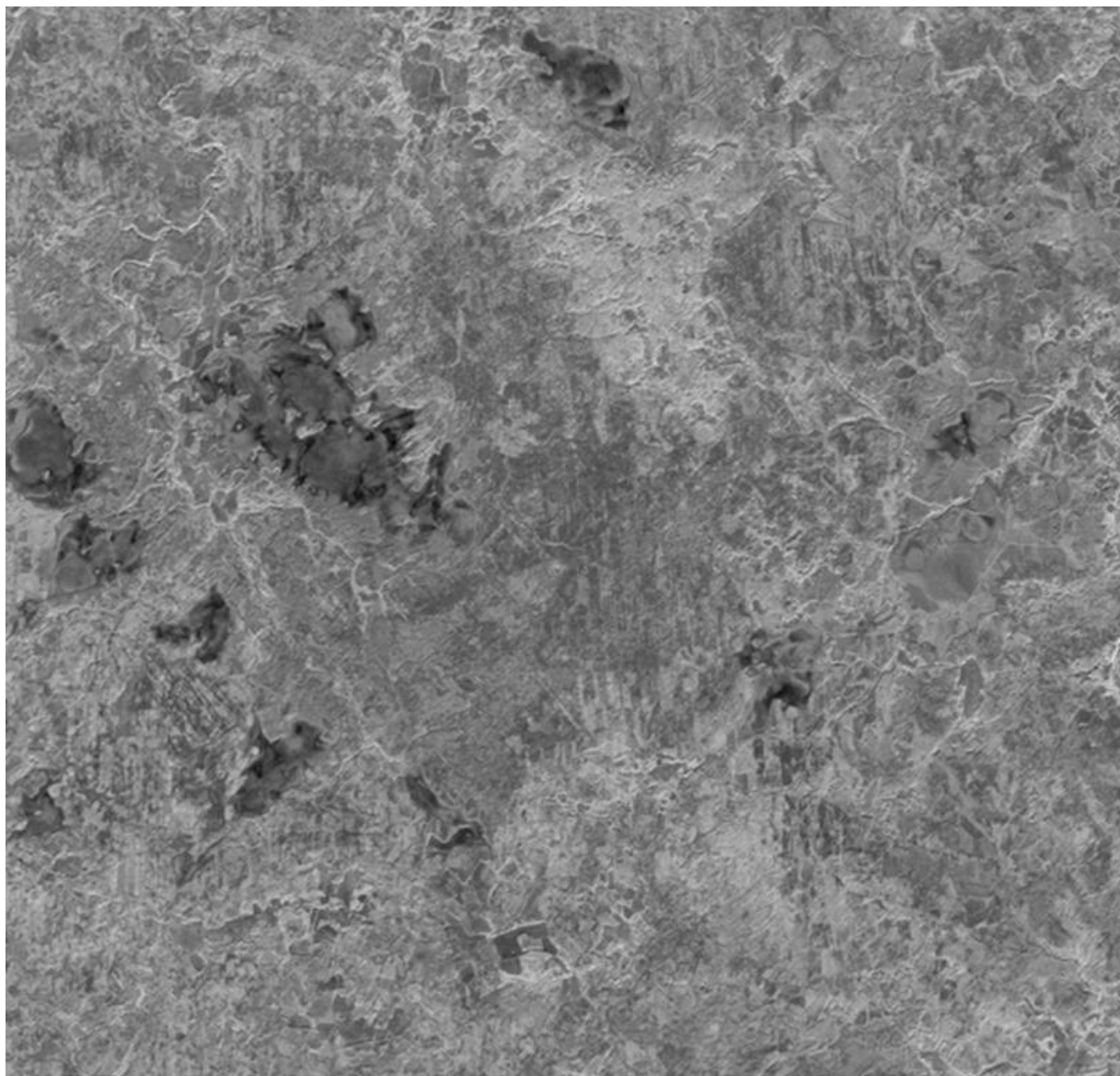


Рисунок 4.4 Инвариант коротковолновых ИК каналов

значениями сильно обводнённые территории летом при их относительно низком обводнении зимой (Рисунок 4.5). Таким образом, уникальные условия первой-второй декады апреля, характеризующие начало вегетации при очень высоком влагосодержании большинства территорий в результате снеготаяния,

лишь частично описываются частным сезонным инвариантом. Поэтому было решено оставить в анализе частный инвариант первой-второй декады апреля, как имеющий значительный вклад в описание общего варьирования и важное семантическое значение с точки зрения характеристики ландшафтного покрова в период весеннего снеготаяния (Рисунок 4.6). Он высокими положительными значениями выделяет наименее обводнённые в начале апреля территории. В результате, три частных инварианта средних ИК каналов описывают 55% их исходного варьирования за все сроки съемки.

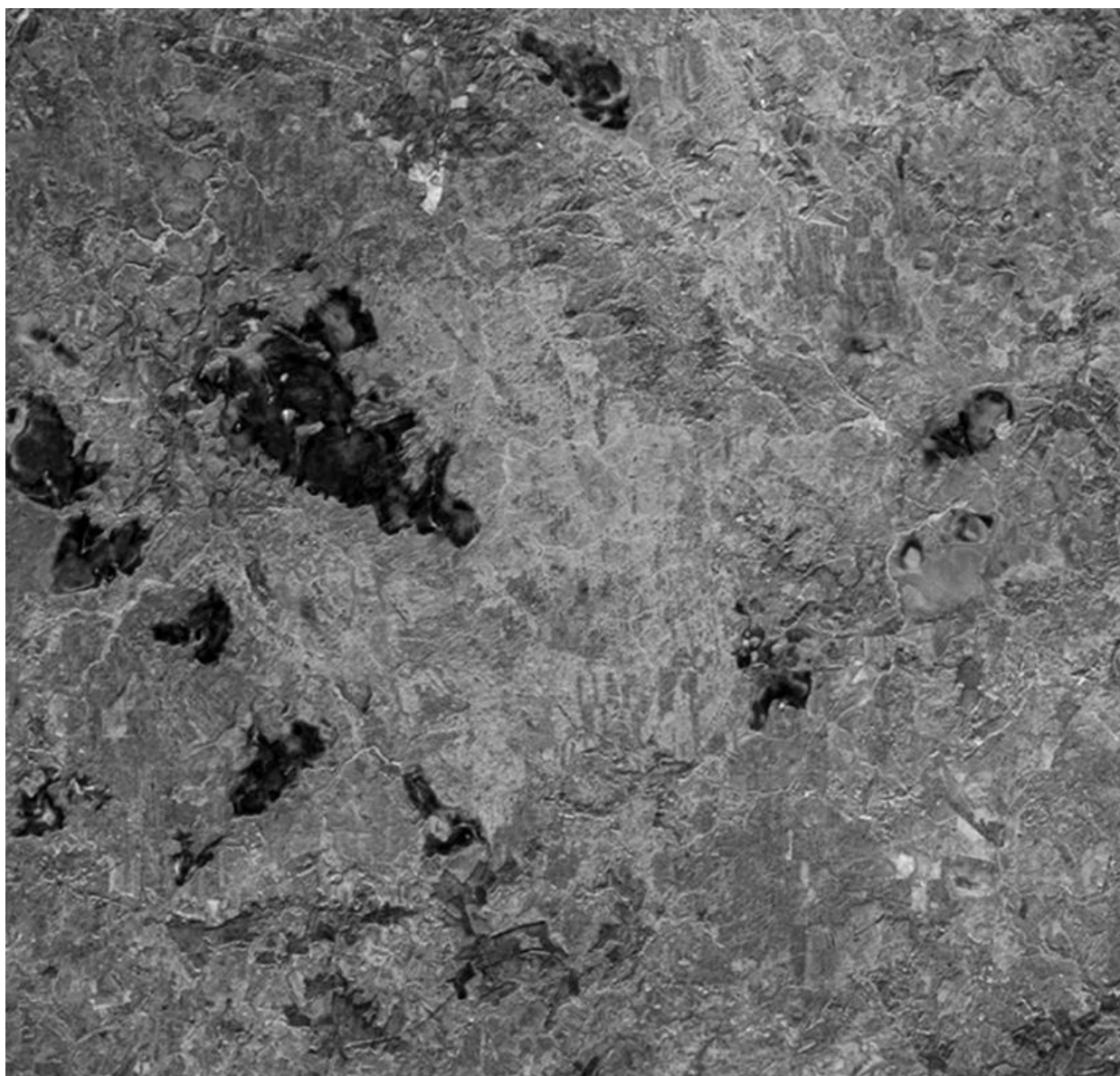


Рисунок 4.5 Сезонный инвариант коротковолновых ИК каналов

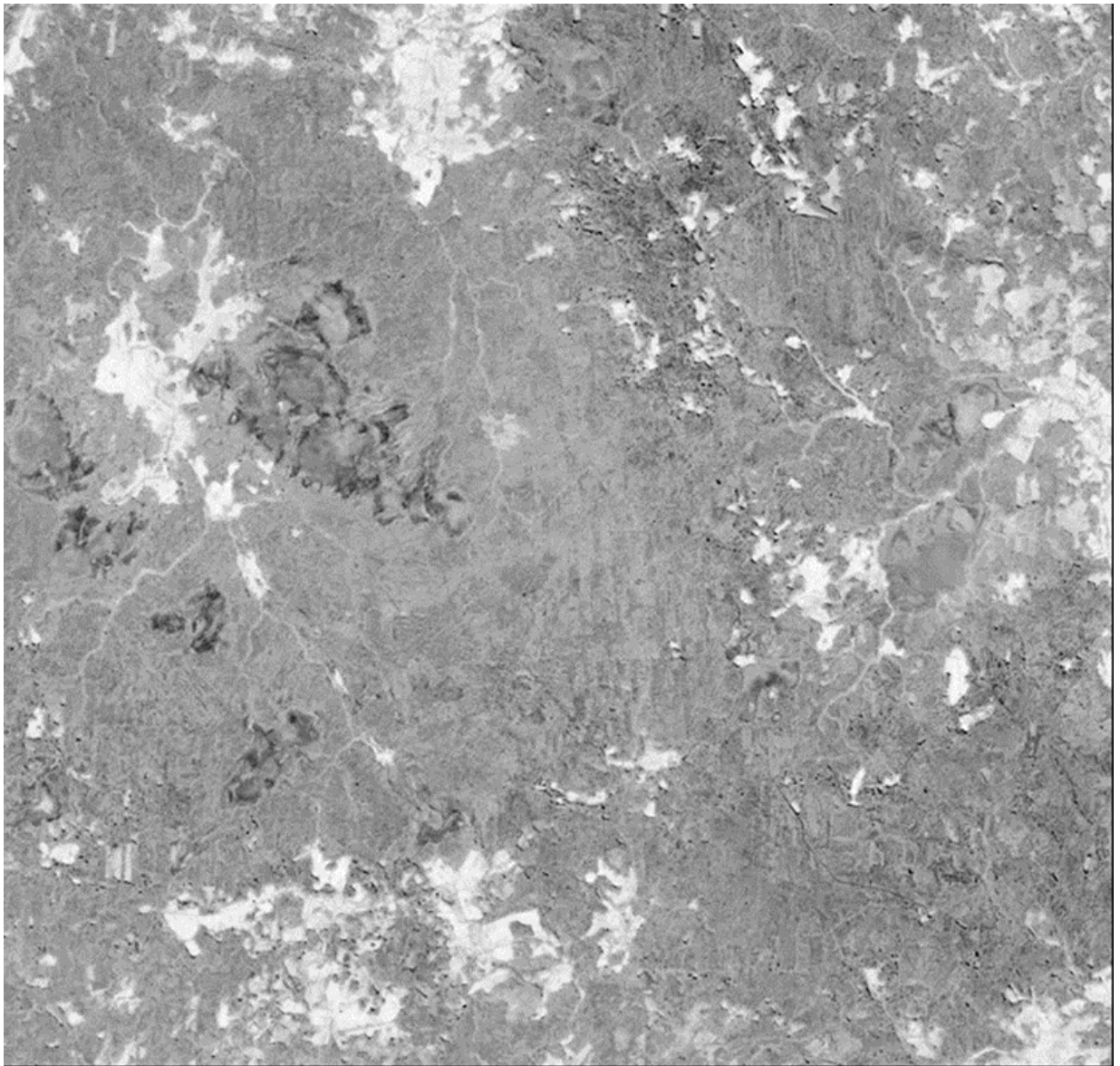


Рисунок 4.6 Инвариант коротковолновых ИК каналов в первой-второй декаде апреле

Таким образом, в результате интеграции компонент выделено 6 частных инвариантов, описывающих общие закономерности отражения и его сезонного хода для всех рассматриваемых каналов и сроков съемки: 1) инвариант общей яркости всех каналов, 2) сезонный инвариант ближнего ИК канала, 3) инвариант ближнего ИК канала, 4) инвариант коротковолновых ИК каналов, 5) сезонный инвариант коротковолновых ИК каналов и 6) инвариант коротковолновых ИК каналов первой-второй декады апреля.

Заключительным этапом выделения общих инвариантов отражения является интеграции 6 полученных частных инвариантов общей яркости, ближнего ИК и коротковолновых ИК каналов методом главных компонент (Таблица 4.5). Первый общий инвариант имеет максимальный положительный КД с частными инвариантами общей яркости и ближнего ИК канала и минимальный отрицательный – с частным сезонным инвариантом коротковолновых ИК каналов, описывая 33% варьирования. Вторым общий инвариант имеет максимальный положительный КД с частным инвариантом коротковолновых ИК каналов и минимальный отрицательный – с частным сезонным инвариантом ближнего ИК канала, описывая 29% варьирования. Третий общий инвариант имеет максимальный положительный КД с частным инвариантом коротковолновых ИК каналов первой-второй декады апреля, а также значимый отрицательный КД с частными инвариантами ближнего и коротковолновых ИК каналов, описывая 20% варьирования.

Таблица 4.5 Результаты интеграции частных инвариантов

Частные инварианты	Интеграция частных инвариантов		
	Первый общий инвариант (КД)	Второй общий инвариант (КД)	Третий общий инвариант (КД)
Общая яркость	0.840645	0.114280	0.329929
Сезонный ближнего ИК канала	0.246959	-0.893927	-0.085403
Ближнего ИК канала	0.678433	0.254471	-0.459837
Коротковолновых ИК каналов	0.011686	0.836600	-0.393373
Сезонный коротковолновых ИК каналов	-0.779216	0.218272	0.274220
Коротковолновых ИК каналов за первую-вторую декады апреля	0.336287	0.334112	0.814722
Описанное варьирование	1.948346	1.736094	1.221308
Доля описания	0.324724	0.289349	0.203551

Таким образом, первый общий инвариант (Рисунок 4.7) высокими положительными значениями выделяет территории с высоким отражением,

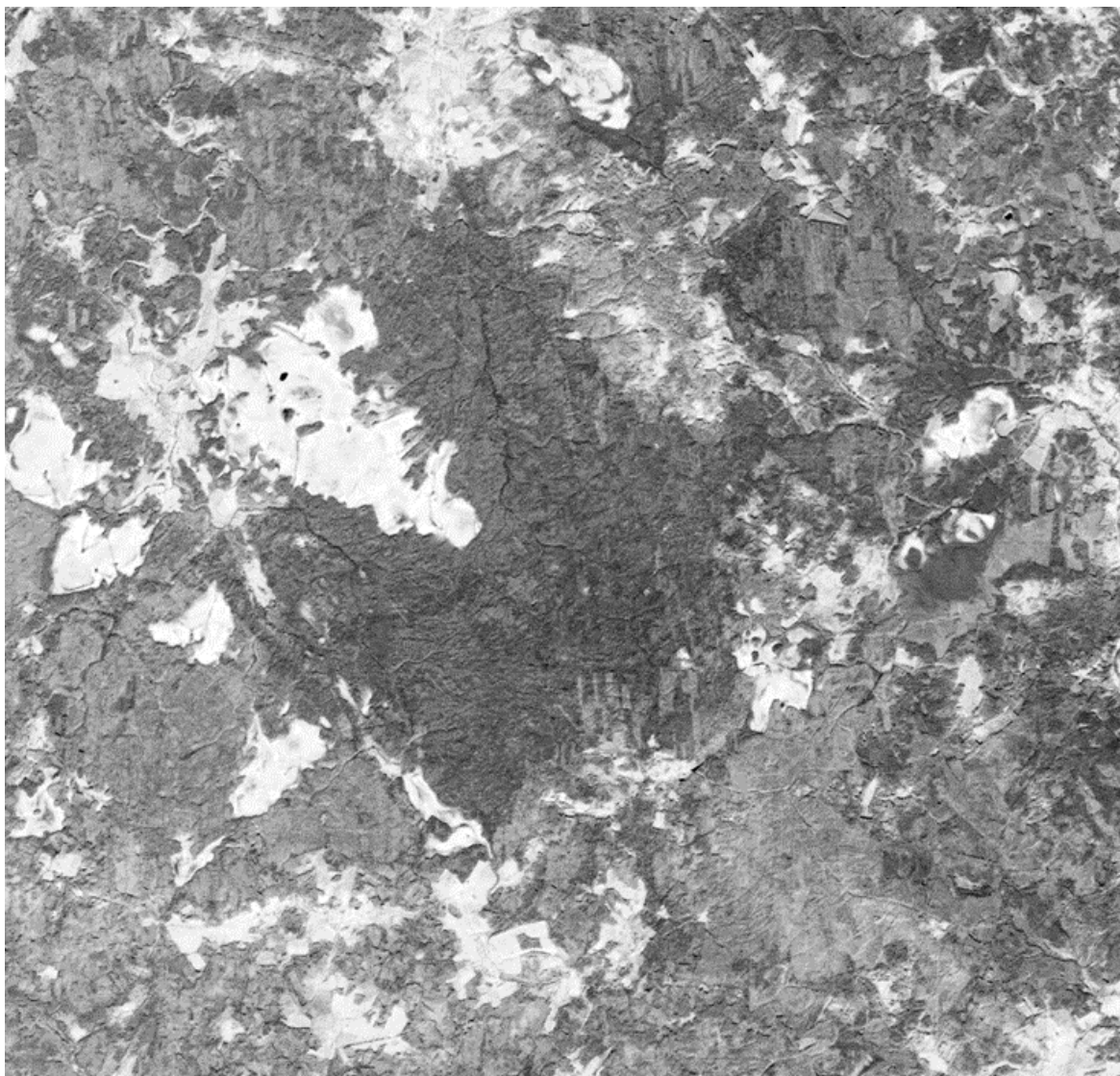


Рисунок 4.7 Первый общий инвариант

сильно обводнённые летом, при их относительно низком обводнении зимой, и высокой интенсивностью вегетации и напротив, низкими отрицательными значениями – территории с низким отражением слабо обводнённые летом, при их относительно сильном обводнении зимой и низкой интенсивностью вегетации. Второй общий инвариант (Рисунок 4.8) высокими положительными значениями выделяет слабо обводнённые территории с высокой интенсивностью вегетации летом и низкой в начале апреля и

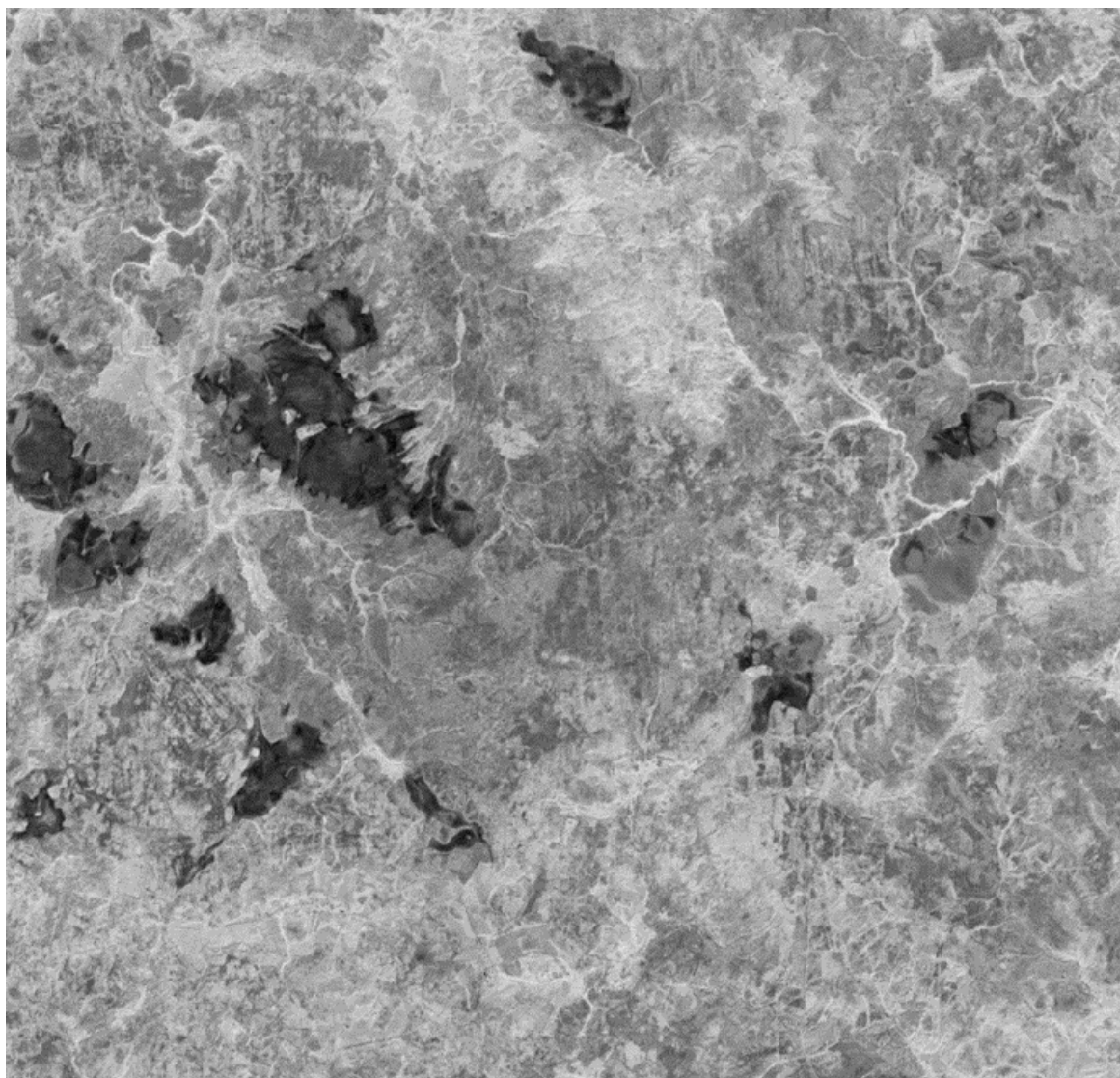


Рисунок 4.8 Второй общий инвариант

наоборот, низкими отрицательными – сильно обводнённые территории с низкой интенсивностью вегетации летом и высокой в начале апреля. Третий общий инвариант (Рисунок 4.9) высокими положительными значениями выделяет территории, наименее обводнённые в начале апреля с относительно низкой интенсивностью вегетации и относительно сильно обводнённые в течении года и наоборот, низкими отрицательными значениями - наиболее обводнённые в начале апреля с относительно высокой интенсивностью фотосинтеза и относительно низко обводнённые в течении года. В результате, три общих инварианта описывают 82% варьирования частных инвариантов общей яркости, ближнего ИК и коротковолновых ИК каналов и, таким образом, около половины исходного варьирования, всех каналов для всех

сроков съемки (114 переменных), может быть представлено через три ортогональных интегральных переменных.

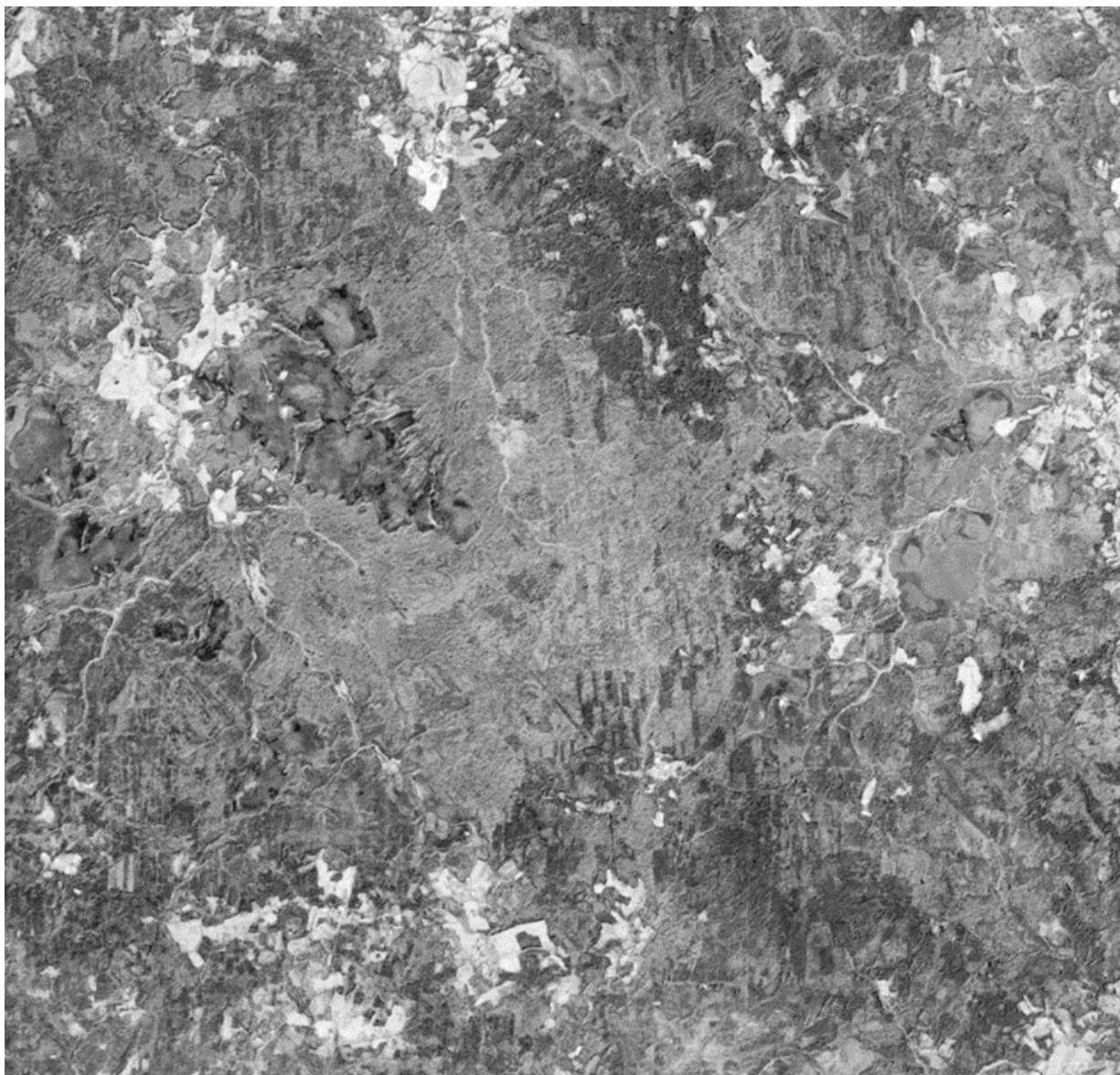


Рисунок 4.9 Третий общий инвариант

Интерпретация полученных инвариантов проводилась от характеристик рельефа для всей территории, от геоботанических описаний и совместно (Таблица 4.6). Для всей территории исследований вклад характеристик рельефа в описание варьирования инвариантов низкий и только для второго инварианта он более значим с R^2 равным 0.28 при ведущем вкладе уклонов рельефа, его кривизны для уровней 150-1300 м, а также его макроэкспозиций.

Мультирегрессионный анализ описаний растительности с общими инвариантами показал достаточно высокий уровень их связи при исправленном R^2 - 0.4-0.5 для первых двух инвариантов и 0.26 для третьего. Основными, связанными с инвариантами, выступают характеристики древостоя в целом и таких пород как ель, берёза, ольха серая, клён, рябина, общие проективные покрытия трав и мхов, проективное покрытие травостоя характерное для различных экотопов.

При совместном описании инвариантов от характеристик рельефа и описаний растительности уровень описания повышается, при этом наиболее значимые характеристики рельефа и описаний растительности входят и в совместную модель. Для первого инварианта R^2 составляет 0.53 при положительной связи с суммой площадей сечения древостоя, проективным покрытием видов наземного яруса характерных для верховых болот, вторичных мелколиственных лесов, лугов и залежей, уклонами рельефа со средним линейными размерами 450 м и выпуклостью и различиями восточных и западных экспозиций с линейными размерами около 1.3 км. Отрицательно первый инвариант определяется высотой древостоя, суммой площадей сечения ели, рябины и клёна, проективным покрытием черники и подроста ели, а также минимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 м.

Второй инвариант определяется от состояния растительности и характеристик рельефа на уровне R^2 - 0.63 и положительно связан с проективным покрытием влажнотравья, суммой площадей сечения липы, различиями в северных и южных экспозициях рельефа с линейными размерами 450 м и около 1 км, максимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 м и 450 м, суммой площадей сечения древостоя, плановой выпуклостью рельефа с линейными размерами около 2.5 км и проективным покрытием ивы. Отрицательно второй инвариант определяется проективным покрытием мхов, и видов наземного яруса характерных для верховых болот, суммой площадей сечения ели и сосны, и кросс-секционная выпуклостью рельефа с линейными размерами около 1 км.

Третий инвариант наименее связан с состоянием растительности и характеристиками рельефа и при $R^2 = 0.37$ положительно связан с суммой площадей сечения ели и клёна, максимальной кривизной рельефа с линейными размерами около 4 км, проективным покрытием лютика едкого и хвоща лугового и минимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 м. Отрицательно третий инвариант определяется суммой площадей сечения березы, и древостоя в целом, проективным покрытием неморальных и болотных видов наземного покрова, минимальной кривизной рельефа и различиями южных и северных экспозиций с линейными размерами 270 м.

Таблица 4.6 Интерпретация интегральных инвариантов с использованием морфометрических характеристик рельефа, растительности и почвы (Байбар и др., 2023)

Общие инварианты			
исправленный R^2 /ведущие переменные в анализе	первый	второй	третий
для характеристик рельефа всей территории	0.102813309/ Высота рельефа, уклон рельефа, минимальная кривизна, кросс-секционная выпуклость и освещённость с востока и юга с линейными размерами около 4 км, максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, кросс-секционная выпуклость и минимальная кривизна с линейными размерами около 1 км, максимальная кривизна с линейными размерами около 2.5 км	0.279236132/ Уклон рельефа, уклон и освещённость с юга с линейными размерами около 2.5 км, минимальная кривизна с линейными размерами 150 м, максимальная кривизна с линейными размерами 270 м, минимальная кривизна и уклон с линейными размерами 450 м, кросс-секционная выпуклость и минимальная кривизна с линейными размерами около 1.3 км, плановая выпуклость и	0.0734437692/ Высота рельефа, уклон, максимальная и минимальная кривизна и кросс-секционная выпуклость с линейными размерами около 1 км, максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, оператор Лапласа, кросс-секционная выпуклость и уклон с линейными размерами около 4 км, освещённость с юга с линейными размерами около 2.5 км и освещённость с востока с линейными размерами около 1.3 км

		освещённость с юга с линейными размерами около 4 км и уклон с линейными размерами около 1 км.	
для характеристик растительности	0.442272049/ Высота древостоя, сумма площадей сечения ели, березы, ольхи серой и рябины, проективное покрытие подбела многолистного, клюквы болотной, лапчатки прямостоячей, черники обыкновенной, лютика едкого и кашубского, марьянника дубравного, подмаренника душистого, кочедыжника женского, кипрея узколистного, подроста ели, ивы и сосны, число видов подлеска, проективное покрытие трав.	0.497507036/ Проективное покрытие мхов и трав, сумма площадей сечения ели и сосны, сумма площадей сечения и высота древостоя, проективное покрытие подбела многолистного, клюквы болотной, черники обыкновенной, луговика дернистого, яснотки зеленчуковой, лапчатки прямостоячей, крапивы двудомной, бора развесистого, лютика кашубского и едкого, марьянника дубравного, звездчатки ланцетолистной, золотарника обыкновенного, смородины, подроста ивы, вяза, ели.	0.26202277/ Сумма площадей сечения ели, клёна, сумма площадей сечения и высота древостоя, проективное покрытие подмаренника душистого, крапивы двудомной, лютика едкого, клюквы болотной, копытня европейского, недотроги обыкновенной, сердечника, бора развесистого, щитовника букового, подроста ели, проективное покрытие мхов.
для характеристик почвы и почвообразующи х пород	0.535 / Оттенок (Hue) горизонтов А, В, гранулометрически й состав органики и горизонта ВС, насыщенность цвета (Chroma) переходных горизонтов А1А2, А2В, светлота	0.432/ Количество почвенных горизонтов, гранулометрически й состав органики, горизонта А и почвообразующих пород, мощность переходного горизонта А1А2,	0.187/ Гранулометрически й состав почвообразующих пород, мощность гумусового горизонта, оттенок цвета горизонта А2, насыщенность цвета органики, и гумусового

	(Value) горизонта С, гранулометрический состав горизонтов А, А2, С, глубина вскипаемости, гранулометрический состав горизонта А, В, мощность органики, почвы, мощность гумусового горизонта и ВС, верхняя граница оглеения	оттенок цвета (Hue) горизонта А2, глубина Fe, Mn конкреций, гранулометрический состав горизонта В, G, светлота цвета (Value) органики, горизонтов А, А2В, насыщенность цвета (Chroma) горизонтов А1А2, А2В, В	горизонта, суммарная мощность и гранулометрический состав органики, оттенок цвета горизонта А2В, светлота цвета почвообразующих пород, гранулометрический состав горизонтов А1А2, А2, В, G, мощность торфа и горизонта А2В, светлота органики и горизонта А2
--	---	---	---

4.2 Инварианты длинноволновых данных Landsat

По вышеупомянутым причинам, тепловых данных Landsat меньше, чем мультиспектральных. За рассматриваемый временной промежуток были отобраны только 15 сроков наблюдения с 1987 по 2019 год (Таблица 4.7). Со второй половины 2019 года Landsat 8 выдает полосчатость, которая периодически повторяется и, соответственно, не может быть исключена применением метода главных компонент. У Landsat 4-5 так же были искажения, но они присутствуют только на отдельных снимках и их местоположение всегда менялось, поэтому они оставались в остатках, неописанных инвариантом (Пузаченко и др., 2019).

Обобщение всех сроков наблюдения за температурой приземного слоя атмосферы методом главных компонент показало, что первые два компонента описывают почти 70% дисперсии температурных значений. На первый параметр порядка температуры приходится 60%, на второй – 10%. Учитывая, что за последние 35 лет ландшафтный покров существенно изменился из-за антропогенного вмешательства (рубки в охранный зоне), ветровалов, обезлесения пойм рек и ручьев бобрами и т.д., а также из-за шума съёмочных систем Landsat 4-5, двух инвариантов более чем достаточно для описания тепловых полей территории исследования.

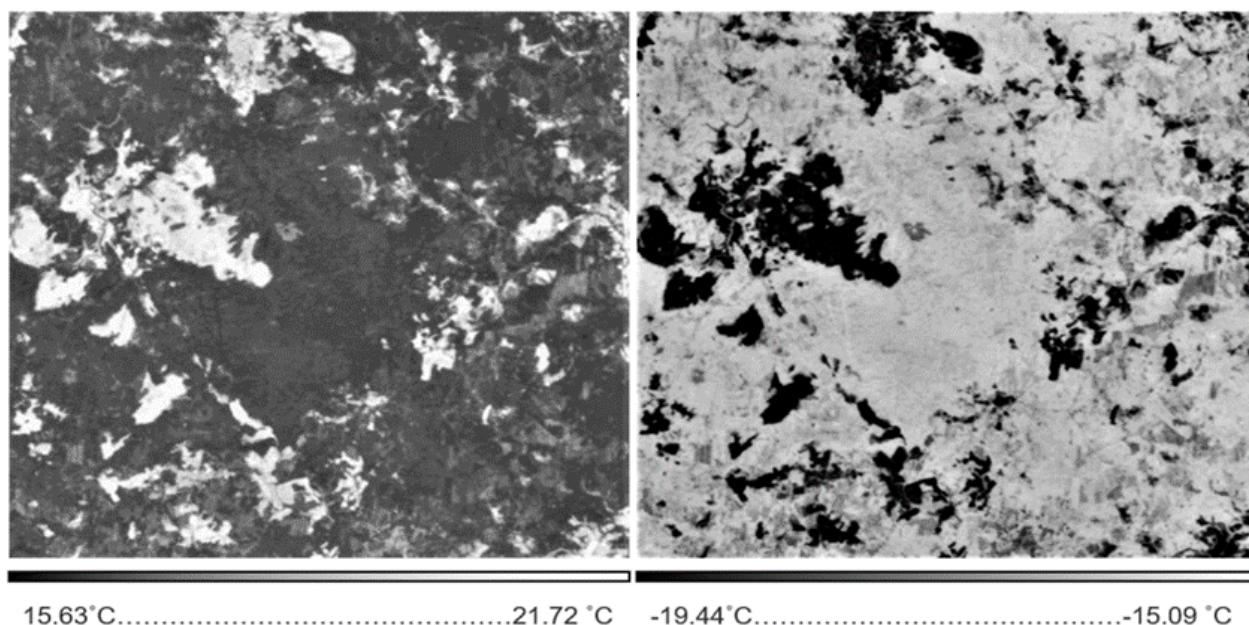
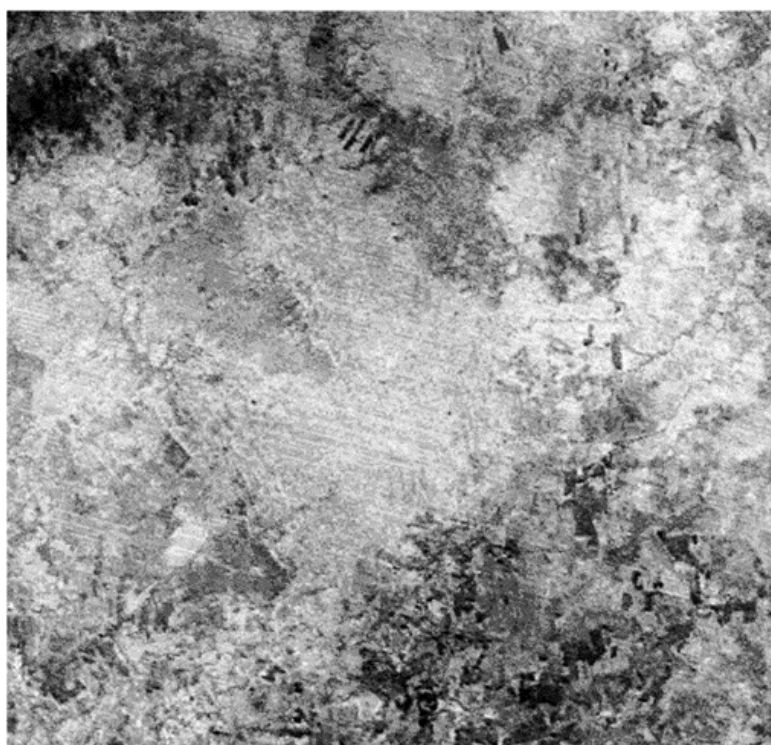


Рисунок 4.10 Первый инвариант тепловых полей, приведенный к температурам: а) самого теплого срока наблюдения (14 августа 2010), б) самого холодного срока наблюдения (6 февраля 2017)

Первый инвариант является сезонным, он с разными знаками определяет температуру бесснежного (с апреля по сентябрь) и снежного (с февраля по март) периода года, положителен для температуры летних месяцев и отрицателен для зимних. Для наглядности безразмерные величины первого параметра порядка приведены к температурам самого теплого (14 августа 2010 года) и самого холодного (6 февраля 2017 года) сроков наблюдения (Рисунок 4.10). На левом рисунке 4.10 видно, что в летнее время наиболее теплыми являются открытые участки (верховые болота, сельскохозяйственные угодья, селитебные земли), относительно теплые вторичные мелколиственные леса, чуть холоднее ельники неморальные с участием широколиственных пород и ельники широколиственные с дубравными видами. Самые холодные – старые заболоченные ельники (ельники сфагново-черничные, черничные и чернично-кисличные). Противоположное распределение температуры приземного слоя атмосферы мы видим на правом рисунке 4.10. В зимнее время года наиболее теплыми являются хвойные леса, а самые холодные – открытые участки.

Второй инвариант температуры, на который приходится 10% описания температурных данных за рассматриваемый временной интервал, связан только с двумя сроками наблюдения 1987 и 1988 года. Согласно рисунку 4.11 данный параметр порядка выделяется из-за шума съемочной системы Landsat 4-5, просматривается



-15.89°C.....-11.14 °C

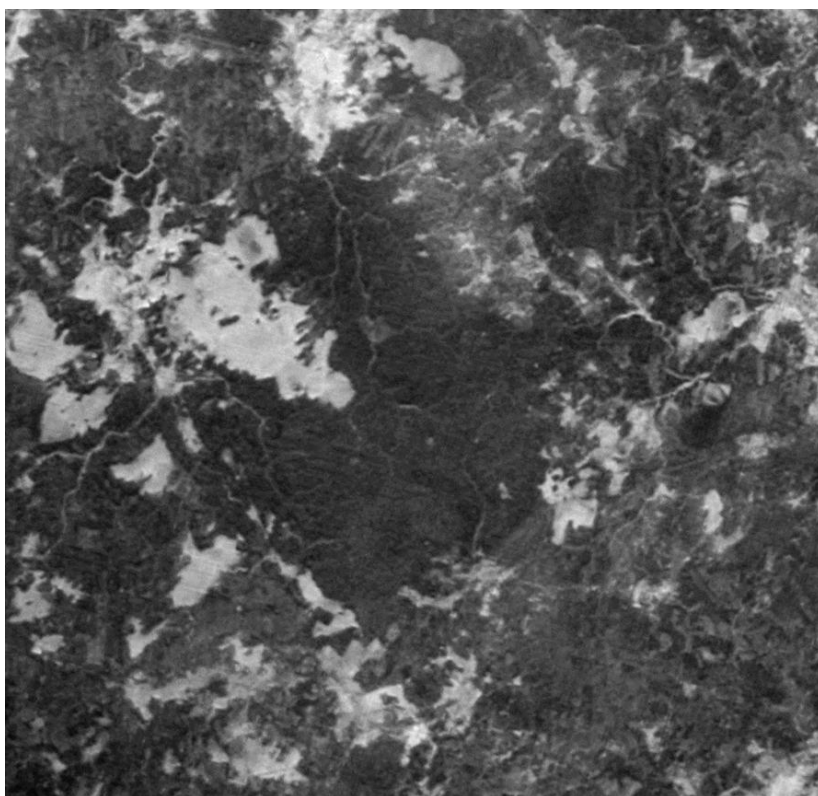
Рисунок 4.11 Второй инвариант тепловых полей, приведенный к температуре 4 февраля 1987 года

полосчатость, отображающая работу сканера. Соответственно, для дальнейшего анализа используется только первый инвариант. Принимая во внимание, что в распределении тепловых полей большое значение имеет сезонный фактор, были рассчитаны инварианты температуры отдельно для снежного и бесснежного периода.

Несмотря на то, что количество зимних сроков наблюдения мало, к ним был применен метод главных компонент. В результате получен 1 зимний инвариант, на который приходится 65% описания температуры в зимние месяцы (Рисунок 4.12). Второй параметр порядка, описывающий 10% зимних температур, связан с ранними снимками Landsat 4-5, на которых присутствует полосчатость. Таким образом, лишний раз продемонстрировано, что не все тепловые снимки Landsat можно использовать для анализа, хотя предварительно все сцены рассматривались на наличие облаков, дымки,

периодически повторяющегося шума съемочной системы. В общей сложности, за 35 лет пригодны для анализа только 12 сроков наблюдения.

Фактически, структура тепловых полей инварианта, рассчитанного для всего года, и зимнего тождественны. Однако, благодаря расчету инвариантов отдельно для бесснежного периода мы получили 2 параметра порядка. Первый летний инвариант можно



считать общим, так как он с одинаковым знаком описывает все сроки наблюдения. На

Рисунок 4.12 Зимний инвариант, приведенный к температуре самого холодного срока наблюдения (6 февраля 2017)

него приходится 65% описания варьирования температуры за бесснежный период. Второй инвариант является сезонным, он положительными значениями определяет структуру тепловых полей в летние месяцы (июнь, июль, август) и отрицательными в весенние и осенние месяцы (апрель – май, сентябрь). Он описывает 11% летней температуры. Согласно рисунку 4.13 первый летний инвариант схож с инвариантом для всего года, а на втором инварианте отчетливо противопоставляются мелколиственные и еловые леса, верховые болота и сельскохозяйственные угодья, селитебные земли ввиду того, что у данных геосистем различная инерционность, они по-разному реагируют на сезонные изменения.

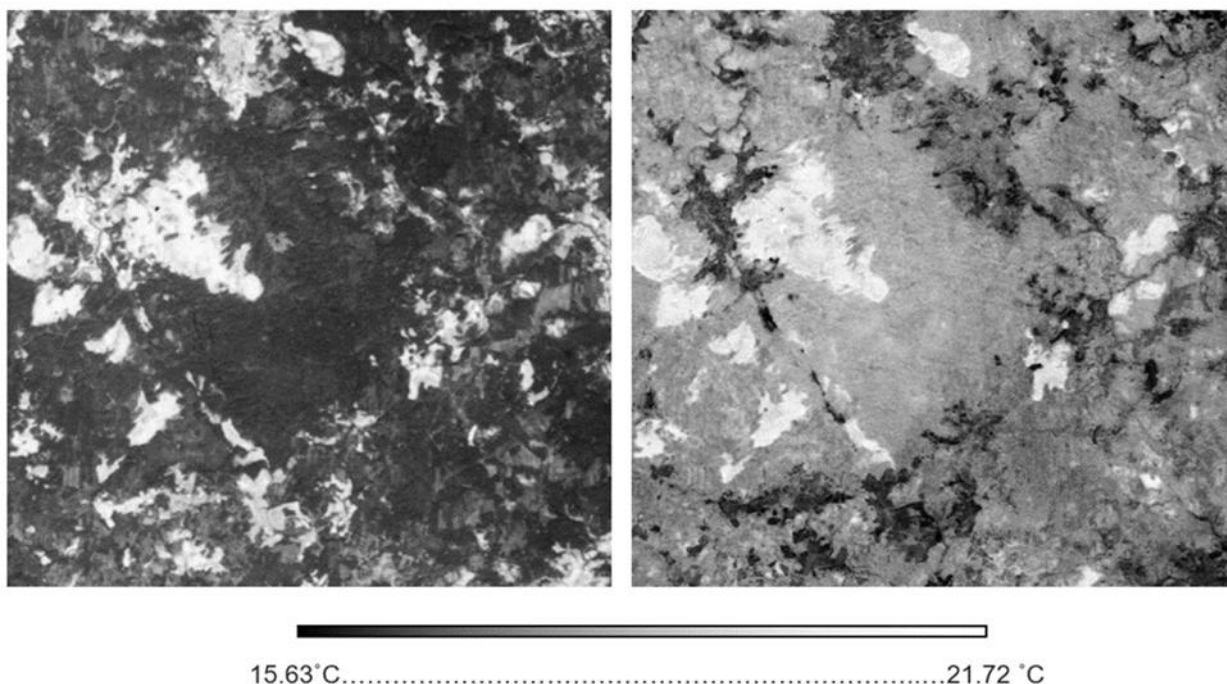


Рисунок 4.13 Инварианты бесснежного периода, приведенные к температуре самого теплого срока наблюдения (14 августа 2010): а) общий, б) сезонный

В общей сложности, мы получили 4 инварианта: для всего года, зимний, летний и весенне-осенний. Для их верификации было выполнено сопоставление с полевыми данными и морфометрическими параметрами рельефа. Выявлено, что структура инварианта для всего года и летнего в первую очередь определяется особенностями функционирования растительного покрова, характеристики которого описывают более 70% их значений. Тепловые поля зимой, весной и осенью чуть хуже описываются растительностью (60%) (Таблица 4.7). Были установлены следующие закономерности: в зимние месяцы у старых лесов, для которых характерны высокие значения суммы площадей сечения, средней высоты древостоя, проективного покрытия подлеска и травянистого яруса, зафиксированы высокие температуры воздуха. При уменьшении проективного покрытия подлеска и трав и увеличении его для мохового яруса наблюдается падение значений температуры. Таким образом, для безлесных территорий с высокими значениями проективного покрытия мхов и трав характерны наиболее низкие температуры, для вторичных мелколиственных лесов с развитым травянистым ярусом – средние, а у старых высокополнотных еловых лесов – наиболее

высокие. В летние месяцы прослеживается зависимость, чем более высокий высокополнотный еловый лес, тем ниже температуры и, чем больше проективное покрытие мохового яруса, тем выше температура.

Таблица 4.7 Процент описания структуры инвариантов поля температур характеристиками растительности, рельефа и их совместными параметрами

	Растительность	Рельеф	Растительность и рельеф
Инвариант для всего года	73.7%	10.3%	77.2%
Зимний инвариант	62.7%	8%	67.9%
Летний инвариант	73.4%	14%	77.1%
Весенне-осенний инвариант	64.6%	37.4%	72.3%

Согласно таблице 4.7, морфометрические характеристики рельефа слабо описывают структуры инвариантов. Наибольший вклад в формирование поля температур вносят мезоформы рельефа с линейными размерами 270 м и 450 м, они представлены меридионально вытянутой и подковообразной моренной грядой на территории исследования. Однако, весенне-осенний инвариант хорошо описывается характеристиками рельефа, наибольший вклад вносят такие характеристики, как крутизна и экспозиция склонов, максимальная и минимальная кривизна, оператор Лапласа. Так, рельеф территории определяет скорость протекания процесса снеготаяния. На вогнутых позициях озерно-водноледниковой котловины снежный покров сохраняется дольше, чем на южных склонах моренных гряд.

Таким образом, при помощи обобщения длинноволновых данных Landsat с 1987 по 2019 год можно выделить устойчивую структуру тепловых полей за бесснежный и снежный период года. При расчете параметров порядка только для сроков без устойчивого снежного покрова можно выделить весенне-осенний инвариант, структура которого в первую очередь определяется протеканием процесса снеготаяния. В целом, инварианты

описывают от 22% до 82% температурных значений конкретного срока наблюдения (при среднем 60%).

Полученные температурные данные могут быть использованы для верификации ландшафтных инвариантов на основе МДДЗ и ЦМР.

4.3 Параметры порядка рельефа

Для каждого иерархического уровня были рассчитаны по 10 морфометрических параметров. В общей сложности было получено 90 переменных, характеризующие рельеф территории исследования. Количество факторов было взято по отметке показателя *Eigenvalue*

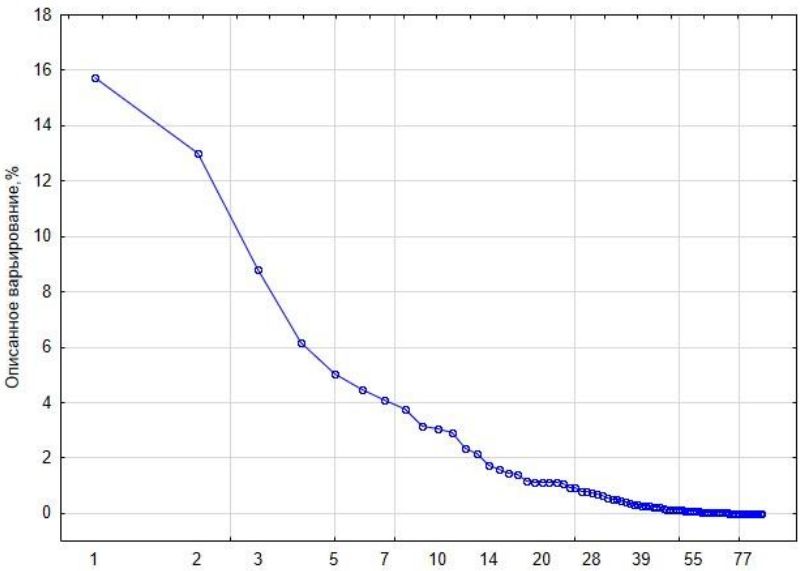


Рисунок 4.14 Размерность пространства 90 переменных рельефа

больше 2. Установлено, что все морфометрические переменные рельефа могут быть описаны первыми 12 параметрами порядка, на которые суммарно приходится 72,5% (Рисунок 4.14). Показало, что на первый фактор приходится 15,7%, на второй – 12,9%, на третий – 8,8%, на четвертый – 6,1%, на пятый – 5%, на шестой – 4,4%, на седьмой – 4,1%, на восьмой – 3,8%, на девятый – 3,1%, на десятый – 3%, на одиннадцатый – 2,9%, на двенадцатый – 2,4% (Рисунок 4.14). Физический смысл факторов выявлялся по показателю нагрузки на факторы (Таблица 4.8).

Таблица 4.8 Параметры порядка рельефа

№	Морфометрические параметры рельефа, его определяющие	
	Определяющие отрицательно	Определяющие положительно

1	Лапласиан (R5, R9, R15, R35), минимальная кривизна (R5, R9, R15), профильная выпуклость (R5, R9), продольная кривизна (R9)	
2	Минимальная кривизна (R43, R55, R81), профильная выпуклость (R43, R55, R81), продольная кривизна (R43, R55, R81), максимальная кривизна (R43, R55, R81)	Профильная выпуклость (R5), продольная кривизна (R5), максимальная кривизна (R5, R9), лапласиан (R9)
3		Крутизна склонов (на всех уровнях)
4	Освещенность с Ю (R43, R55, R81, R127)	Освещенность с В (R35, R43, R55, R81, R127)
5	Лапласиан (R15), максимальная кривизна (R15), профильная выпуклость (R15), продольная кривизна (R15)	Лапласиан (127), минимальная кривизна (R127)
6	Освещенность с Ю (на всех уровнях)	
7	Профильная выпуклость (R55, R81)	Кривизна поперечного сечения (R55, R81)
8		Максимальная кривизна (R127), лапласиан (R127)
9	Освещенность с В (R5, R9, R15)	
10	Освещенность с Ю (R5, R9, R15)	
11	Освещенность с Ю (R5, R9)	
12	Профильная выпуклость (R127), продольная кривизна (R127)	Плановая выпуклость (R127)

Согласно таблице 4.8, первый параметр порядка связан с показателем Лапласа, минимальной кривизной, профильной выпуклостью, продольной кривизной на уровне микро- и мезорельефа шестого, седьмого порядка, высокими значениями маркируются вогнутые формы рельефа, такие как долины рек, низкими значениями – небольшие холмики на моренных грядах. Второй параметр порядка положительно связан с профильной выпуклостью, продольной и максимальной кривизной, лапласианом на уровне микрорельефа и отрицательно с минимальной и максимальной кривизной, профильной выпуклостью, продольной кривизной на уровне мезорельефа. Так, низкими

значениями выделяются долин рек, а их склоны высокими. Моренные гряды рассматриваются как сочетание микроповышений и ложбин, по которым текла талая ледниковая вода. Третий - связан с крутизной склонов на всех иерархических уровнях, показано, что озерно-водноледниковые котловины относительно плоские в отличие от склонов моренных гряд и долины реки Жукопа. Наибольшая же крутизна характерна для крутого склона долины реки Ночна в восточной части территории исследования. Четвертый параметр порядка связан с экспозицией склонов мезоформ рельефа, высокие значения характерны для склонов северо-восточной экспозиции, низкие – юго-западной. Пятый – отрицательно связан с Лапласианом, максимальной кривизной, профильной выпуклостью, продольной кривизной форм рельефа с линейными размерами 450 метров и положительно с лапласианом и минимальной кривизной мезорельефа первого порядка. Наибольшие значения характерны для моренных гряд и долин крупных рек, наименьшие – для подножий склонов гряд и долины рек Межа и Жукопа. Шестой параметр порядка связан освещенностью с юга для всех уровней, высокими значениями выделяются формы рельефа с преимущественно южной экспозицией, низкими – северной. Седьмой – отрицательно связан с профильной выпуклостью мезоформ рельефа и положительно – с кривизной поперечного сечения. Так, высокими значениями маркируются склоны гряд и долины рек Тудовка и Ночна, низкими – их вершины. Восьмой параметр порядка связан с максимальной кривизной и лапласианом для самых крупных мезоформ рельефа (моренные гряды). Девятый – противопоставляет западную и восточную экспозицию склонов долин рек и меридионально вытянутого участка моренной гряды, а десятый и одиннадцатый параметр порядка связан с южной и северной экспозицией у микро- и мезоформ рельефа. Последний связан с мезоформами рельефа первого порядка, отрицательно определяется профильной выпуклостью и продольной кривизной, положительно – с плановой выпуклостью. Маркируется наиболее крутые склоны гряды и уступ долины реки Тудовка.

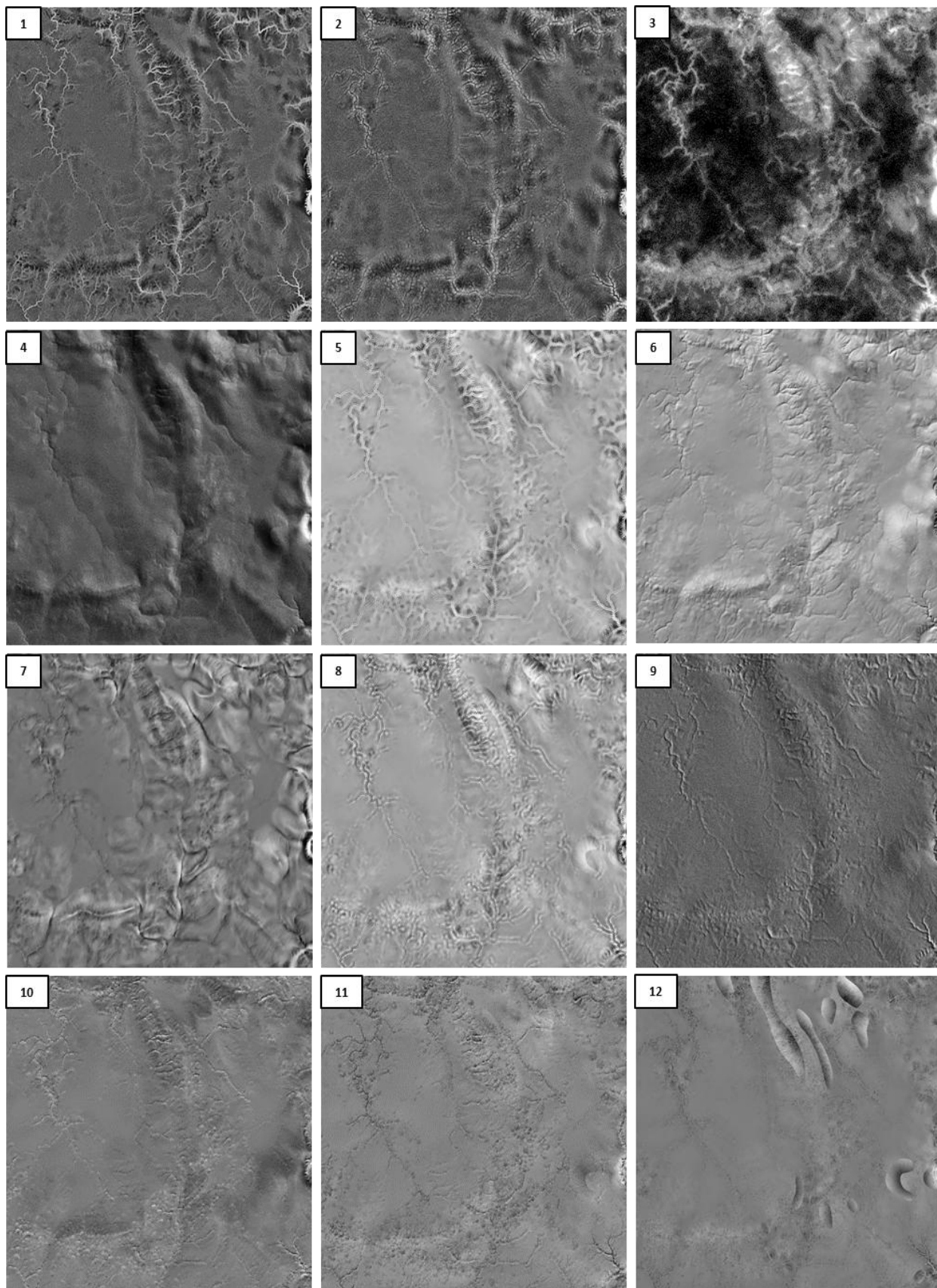


Рисунок 4.15 Параметры порядка рельефа

Итак, на параметрах порядка рельефа маркируются, в первую очередь, плоские озерно-водноледниковые котловины, склоны и вершины моренных гряд с микроповышениями и ложбинами, по которым прорывалась талая ледниковая вода, долины крупных рек таких как Межа, Тюзьма, Жукопа и Тудовка (Рисунок 4.15). Особое значение имеет экспозиция склонов, для моренных гряд преимущественно южное или северное, для меридионально вытянутых рек – западное или восточное.

4.4 Ландшафтные инварианты на основе МДЗ, ЦМР и их верификация по полевым данным

Интеграция 12 параметров порядка рельефа с 3 инвариантами отражения позволила нам получить 6 ландшафтных инвариантов (3 основных и, так как зависимости не линейны, еще 3 дописывающих их зеркальных) (Рисунок 4.16). Таким образом, что не попадает в ведущие инварианты, с обратным знаком описывает связи, попадает в доописывающие ландшафтные инварианты. Например, чем больше крутизна склонов моренных гряд, тем активнее протекает фотосинтез, но если значения данного показателя сильно большие, например, обрывистый берег реки Тудовка, то это уже лимитирующий фактор для произрастания растительности.

Первый ландшафтный инвариант имеет тесную положительную связь со вторым инвариантом отражения (положителен с влажностью для всего года и отрицателен для сезонного протекания фотосинтеза) и с третьим параметром порядка рельефа (крутизна склонов на всех иерархических уровнях) (Таблица 4.9). Таким образом, он выделяет склоны речных долин, моренных гряд и холмов, для которых характерно относительно высокие значения крутизны, низкое влагосодержание в течение всего года и активное протекание процесса фотосинтеза. Им противопоставляются верховые болота и заболоченные ельники – переувлажненность в течение всего года, активность протекания фотосинтеза преимущественно только весной и маленькие значения крутизны.

Шестой инвариант дополняет первый за счет выделения обрывистого правого берега реки Тудовка высотой 20 – 25 метров.

Второй ландшафтный инвариант связан с первым и третьим инвариантом отражения (яркость и фотосинтез для всего года, сезонные изменения влажности, влажность в период снеготаяния) и одиннадцатым и двенадцатым параметром порядка рельефа (освещенность с Ю микро- и мезоформ рельефа, плановая и продольная выпуклость макроформ рельефа) (Таблица 4.9). Он выделяет территории с активным фотосинтезом на выпуклых формах рельефа преимущественно с Ю, ЮЗ и З экспозициями, с низкой биомассой, малым влагосодержанием в первой половине апреля и высоким летом. В первую очередь это суходольные луга и верховые болота. Им противопоставляются леса на склонах моренных гряд и речные долины – высокое влагосодержание в апреле и низкое летом, большое количество биомассы и неактивным протеканием фотосинтеза на вогнутых формах рельефа преимущественно С, СВ и В экспозиции. Пятый инвариант дополняет второй, низкими значениями выделяет участки на склонах моренных гряд Ю и ЮЗ экспозиции, но с относительно большой биомассой, то есть он противопоставляет сельскохозяйственные угодья и вторичные мелколиственные леса.

Для третьего ландшафтного инварианта характерна связь с первым и третьим инвариантом отражения и вторым, четвертым, шестым параметром порядка рельефа (минимальная и максимальная кривизна, профильная выпуклость, продольная кривизна для микро- и мезоформ рельефа, освещенность с Ю для всех уровней и освещенность с В для мезоуровня). Он выделяет участки с низкой интенсивностью протекания фотосинтеза и влагосодержанием, но большими значениями биомассы на вогнутых формах микро- и мезорельефа с преимущественно СВ и З экспозицией – склоны гряд и речные долины. Также вершины гряд и верховые болота, для которых характерно активный фотосинтез, высокое влагосодержание, маленькая биомасса, выпуклые формы рельефа с Ю экспозицией. Четвертый инвариант

дополняет третий, на нем выделяются участки склонов моренных гряд, для которых, как и для болот характерно ранее высвобождение от снежного покрова, активный фотосинтез.

Таблица 4.9 Результаты интеграции инвариантов отражения и рельефа

	Ландшафтные инварианты					
	1	2	3	4	5	6
1 отражения	0.22	0.53	-0.53	0.44	0.42	0.12
2 отражения	0.83	-0.23	0.05	-0.041	-0.18	0.47
3 отражения	0.14	0.53	0.55	-0.46	0.42	0.08
2 рельефа	-0.01	0.25	0.28	0.23	-0.2	0
3 рельефа	0.82	-0.16	0.04	0.03	0.13	-0.46
4 рельефа	-0.19	-0.06	0.25	0.21	0.04	0.11
6 рельефа	-0.01	-0.17	0.56	0.47	0.13	0
11 рельефа	-0.11	-0.39	-0.05	-0.04	0.31	0.06
12 рельефа	-0.16	-0.41	-0.03	-0.03	0.32	0.09
Собственные значения	1.52	1.22	1.18	0.82	0.78	0.49
Доля общей дисперсии	0.1	0.08	0.08	0.06	0.05	0.03

Была выполнена верификация ландшафтных инвариантов, полученных на основе интеграции мультиспектральных данных Landsat и цифровой модели рельефа, на основе полевых описаний растительности, почвы и почвообразующих пород при помощи мультирегрессионного анализа. Выявлено, что характеристики растительности описывают ландшафтные инварианты от 30% до 68%, при этом, основной вклад вносят характеристики травянистого яруса (проективное покрытие по видам). Характеристики почвы и почвообразующих пород определяют от 10% до 35%, наиболее информативны такие характеристики, как гранулометрический состав почвенных горизонтов, а также цвет по шкале Манселла переходных горизонтов, аналогичные результаты были получены при обработке

гиперспектральных данных (Пузаченко и др., 2023). Совместно характеристики растительности, почвы и почвообразующих пород описывают от 42% до 74% значений ландшафтных инвариантов. Таким образом, продемонстрировано, что пространственно-временные ландшафтные инварианты, полученные на основе МДДЗ и ЦМР, имеет тесную взаимосвязь с полевыми данными (Таблица 4.10) и могут быть использованы как основа для картографирования устойчивых состояний южно-таежного ландшафта.

Таблица 4.10 Результаты мультирегрессионного анализа от полевых данных

Ландшафтный инвариант	Мультирегрессионный анализ (R^2) от характеристик		
	растительности (древостой 2891 описаний, травостой 2034 описаний, совместно 1873 описания)	почв и почвообразующих пород 1606 описаний	растительности, почв и почвообразующих пород 1317 описаний
1	0.26, 0.65, 0.68	0.35	0.74
2	0.32, 0.41, 0.48	0.20	0.54
3	0.18, 0.30, 0.36	0.15	0.49
4	0.21, 0.27, 0.36	0.14	0.44
5	0.15, 0.31, 0.32	0.14	0.39
6	0.16, 0.21, 0.30	0.10	0.42

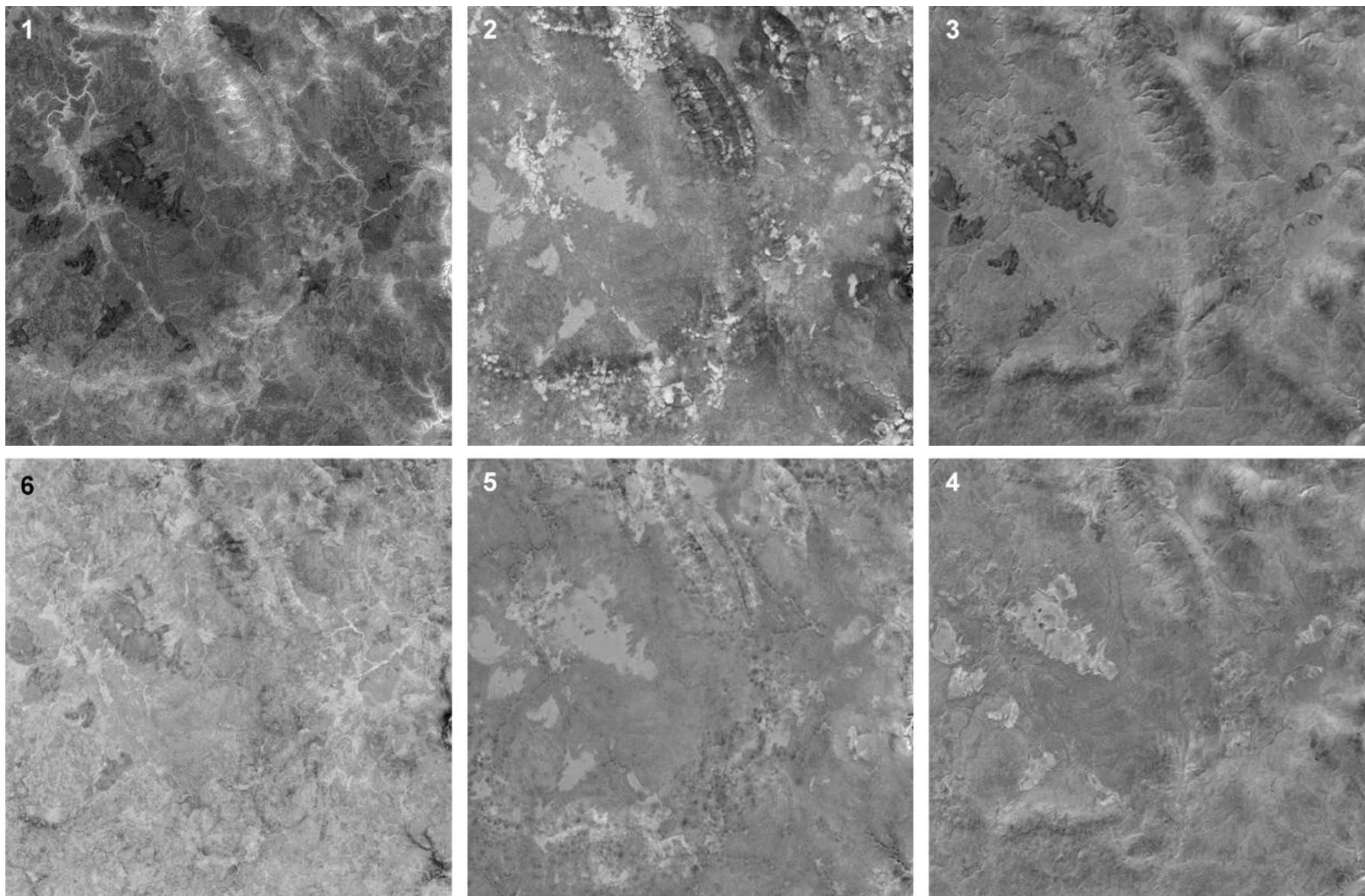


Рисунок 4.16 Ландшафтные инварианты

4.5 Карта инвариантных биогеофизических состояний южно-таежного ландшафта

Классификация ландшафтных инвариантов

Результаты мультирегрессионного анализа показали, что ландшафтные инварианты имеют физический смысл, так как хорошо описываются характеристиками растительности и почвы, полученными непосредственно в ходе полевых работ за временной интервал почти идентичный работе съемочных систем Landsat 4 - 9. Таким образом, на основе ландшафтных инвариантов могут быть получены карты устойчивых состояний ландшафтов, которые отчасти тождественны традиционным ландшафтными картам, однако в отличие от них отражают ландшафтную структуру за определенный временной интервал.

Была выполнена дихотомическая классификация ландшафтных инвариантов на 6 уровне (максимально 64 класса). Малые классы с площадью меньше 0,1% от территории исследования были объединены с ближайшими и, таким образом, был получен 41 класс (Рисунок 4.17).

Все полученные классы можно разбить на 5 блоков. Первый блок (1 – 8 класс) включает в себя сильно сомкнутые средневысокие вторичные хвойно-мелколиственные леса, которые приурочены к вершинам и склонам моренных гряд преимущественно южной и западной экспозиции. Так как на таких позициях наиболее благоприятные условия произрастания ели, здесь росли высокостойные еловые леса, которые подвергались активным рубкам. На центральной меридионально вытянутой гряде были небольшие населенные пункты, жители которых, вероятно, занимались сплошными рубками. После того, как все потенциально пригодные еловые леса были вырублены, население покинуло гряду и сейчас мы наблюдаем, что леса на гряде преимущественно относятся к классам хвойно-мелколиственных лесов (стадия сукцессионного восстановления), а поселки были заброшены, перешли из 41 класса селитвы в 39 класс лугов.

Второй блок связан с верховыми болотами (9 - 15 класс). Результаты классификации хорошо отражают дифференциацию внутри них, выделяются зоны наиболее и наименее обводненные. В отдельный класс попали разреженные сосняки по болоту. Согласно полученной карте, можно выделить участки болот, которые претерпели антропогенное воздействие, например, на севере верхового болота Катин Мох участок был осушен, а торф был использован для удобрения ближайших сельскохозяйственных угодий.

Третий блок (16 – 29 класс) объединяет мелколиственно-хвойные, хвойные и смешанные леса, которые занимают наибольшие площади на территории исследования. Они представлены ельниками различной степени переувлажнения, на наиболее дренированных слабовыпуклых поверхностях преобладают сильно- и среднесомкнутые ельники неморальные, так же они встречаются на вогнутых позициях на границе между моренной грядой и озерно-ледниковой равниной, так как там происходит выход минеральных грунтовых вод. На относительно пониженных слабовогнутых участках произрастают заболоченные ельники кустарничково-сфагновые.

Четвертый блок (30 – 38 класс) включает в себя мелколиственные леса, связанные с сукцессионным восстановлением территории. В отличие от лесов первого блока сукцессия у них началась значительно позже. Если мы будем рассматривать травянистый ярус хвойно-мелколиственных лесов первого блока, то доминантами будут типично лесные виды такие как кислица, майник двулистный, зеленчук желтый, хвощ лесной и т.д. А в мелколиственных лесах 4 блока довольно часто встречаются луговые виды, например, зверобой продырявленный, клевер луговой, душистый колосок и т.д.

Пятый блок объединяет с 39 по 41 класс. Сюда попали геосистемы, претерпевшие антропогенное воздействие: луга, вырубки и населенные пункты. Все перечисленные классы приурочены к наиболее возвышенным, дренированным, относительно крутым формам рельефа с преимущественно Ю экспозицией. В условиях южной тайги люди выбирали наиболее теплые и

относительно сухие места для проживания, ведения сельского и лесного хозяйства.

Проверка полученных классов производилась на основе пошагового дискриминантного анализа от внутренних данных (компонент отражения снимков, морфометрических характеристик рельефа, данных длинноволнового канала Landsat, который анализировался отдельно) и внешних (характеристик растительности, почвы и почвообразующих пород, полученных непосредственно в поле).

Было выявлено, что компоненты отражения снимков на 31.3% верно распознают принадлежность к классам, характеристики рельефа – на 26.5%, а совместно – на 67.5%, что почти на 10% больше, чем их сумма. Это свидетельствует о существовании эмерджентного эффекта. Несмотря на то, что температура приземных слоев атмосферы - важный показатель функционирования геосистемы, определяет скорость протекания таких процессов как фотосинтез, транспирация и т.д., данные длинноволнового канала только на 21.9% распознают принадлежность к классам.

Была выявлена тесная связь между полученными классами и полевыми данными. Характеристики растительности более, чем на 40% определяют принадлежность точек. При этом, ведущее значение оказывает травяно-моховой ярус, который в 34.3% случаев верно распознает принадлежность к классу, в то время как характеристики древостоя только на 16.6% (Байбар и др., 2023в). Характеристики почвы и почвообразующих пород верно определяют класс в почти 24% случаев, а совместно с характеристиками растительности более чем 50%.

Совместно внутренние и внешние данные без длинноволнового излучения на 85.7% верно определяют класс. Использование данных теплового канала почти на 1% ухудшают этот показатель. К сожалению, качество температурных данных Landsat оставляет желать лучшего, в виду того, что съемочная аппаратура производит съемку территории свыше расчетного времени своей работы.

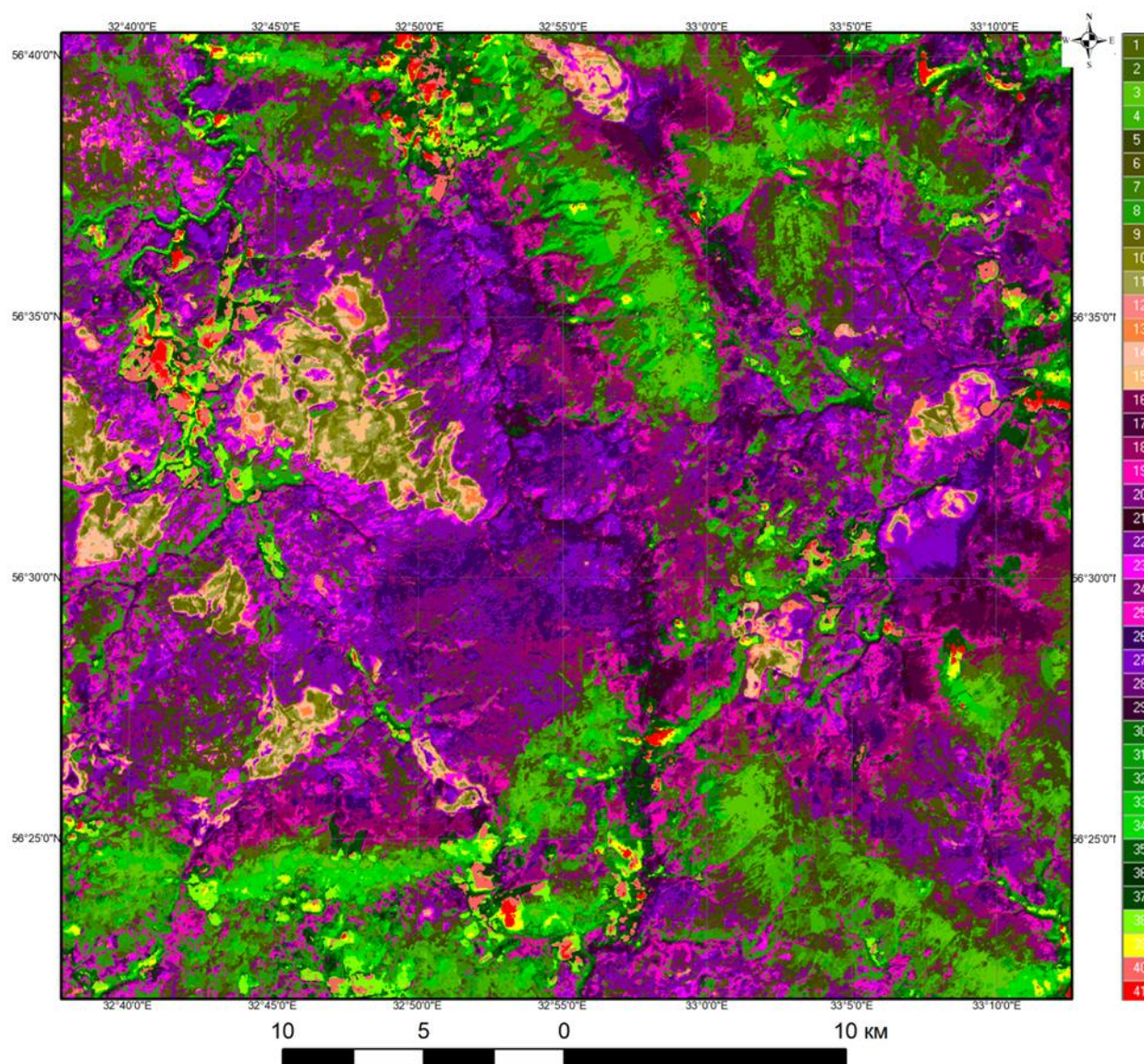


Рисунок 4.17 Карта инвариантных биофизических состояний ландшафтов, полученная на основе классификация ландшафтных инвариантов (1 - 8 класс – хвойно-мелколиственные, 9 -15 класс – верховые болота, 16 - 29 класс – мелколиственно-хвойные и хвойные леса, 30 – 38 класс – мелколиственные леса, 39 – 41 класс – луга, сенокосы, селитебные земли)

Таблица 4.11 Результаты пошагового дискриминантного анализа классов

Пошаговый дискриминантный анализ классов от	Доля (%) верно определённых точек
ВНУТРЕННИХ ДАННЫХ	
компонент отражения снимков	31.3 (1546752)
Длинноволновое излучение (ДИ)	21.9 (1546752)
характеристик рельефа	26.5 (1546752)

компонент отражения снимков и характеристик рельефа	67.5 (1546752)
компонент отражения снимков, ДИ и характеристик рельефа	66.5 (1546752)
ВНЕШНИХ ДАННЫХ	
характеристик наземного покрова	34.3 (2013)
характеристик древостоя	16.6 (2891)
характеристик растительности	43.0 (1878)
характеристик почв и отложений	23.9 (1606)
характеристик растительности и почв	52.1 (1317)
ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ДАННЫХ	
Всех переменные без ДИ	85.7 (1317)

Характеристика классов карты инвариантных биогеофизических состояний южно-таежного ландшафта

На первом этапе при помощи дисперсионного анализа были получены средние и медианные количественные показатели морфометрики рельефа, характеристик растительности, почв и почвообразующих пород, характеризующие определенный класс. На втором этапе был проведен синтез всех показателей и построена интегральная легенда, соответствующая традиционной для ландшафтной карты. Такая легенда получается более компактной и, соответственно, удобной для получения первичной информации о классе, однако, в приложениях 1 – 15 приведены более подробные количественные и качественные характеристики классов.

Рельеф

При верификации ландшафтных инвариантов от морфометрических характеристик рельефа при помощи мультирегрессионного анализа были выявлены параметры, которые в наибольшей степени влияют на пространственное распределение устойчивых инвариантных состояний ландшафта. Соответственно, их использование позволит получить наиболее информативные данные, характеризующие класс.

Таким образом, на их основе была составлена количественная легенда следующих характеристик: для микроформ рельефа (иерархический уровень R с линейными размерами 30 м) - абсолютная высота, крутизна склонов, освещенность с Ю, максимальная и минимальная кривизна, для мезоформ рельефа – освещенность с В (R35, линейные размеры 1050 м), минимальная и максимальная кривизна (R43, линейные

размеры 1290 м), крутизна склонов (R55, линейные размеры 1650 м), крутизна склонов, освещенность с Ю, максимальная и минимальная кривизна (R81, линейные размеры 2430 м) (Приложение 1). Для территории исследования наиболее важен мезорельеф, что было показано при выявлении континуальности и дискретности границ растительных ассоциаций (Байбар и др., 2019). Относительно высокие моренные гряды противопоставляются моренно-озерно-водноледниковые котловины. Поэтому для составления легенды наиболее важны показатели экспозиции, для центральной меридионально вытянутой гряды - западная или восточная, для подковообразной – южная или северная. В условиях переувлажнения особое значение имеет форма поверхности, вогнутая или выпуклая, поэтому совместно рассматриваются максимальная и минимальная кривизна. На рисунке 4.18 показано, как соотносятся между собой данные показатели. Так же на перераспределение воды в ландшафте влияет крутизна склонов, чем

		maximum curvature		
		convex	straight	concave
minimum curvature	convex	 X/X peak		
	straight	 X/S ridge	 S/S plain	
	concave	 X/V saddle	 S/V channel	 V/V pit

Рисунок 4.18 Соотношение максимальной и минимальной кривизны (Dikau, 1989)

больше показатель, тем менее заболоченные местообитания и, соответственно, более продуктивные леса.

В Приложении 2 и 3 представлены качественные легенды морфометрики рельефа. В результате, для блока хвойно-мелколиственных лесов характерны относительно высокие абсолютные высоты, преимущественно выпуклые формы рельефа Ю и ЮЗ экспозиции, идеальные условия для произрастания высокобонитетных еловых лесов, которые были вырублены и сейчас мы наблюдаем за их восстановлением (Рисунок 3.19).

Рельеф влияет на дифференциацию ельников. На средневысоких положениях в рельефе, на слабовогнутых формах с преимущественно С и СВ экспозицией произрастают ельники влажнотравные. Ельники неморальные также приурочены к средним абсолютным высотам, но для них характерны относительно высокие показатели крутизны склонов, выпуклые поверхности и преимущественно Ю и З экспозиция. На относительно пониженных участках, плоских формах рельефа произрастают ельники с доминированием бореальных видов.

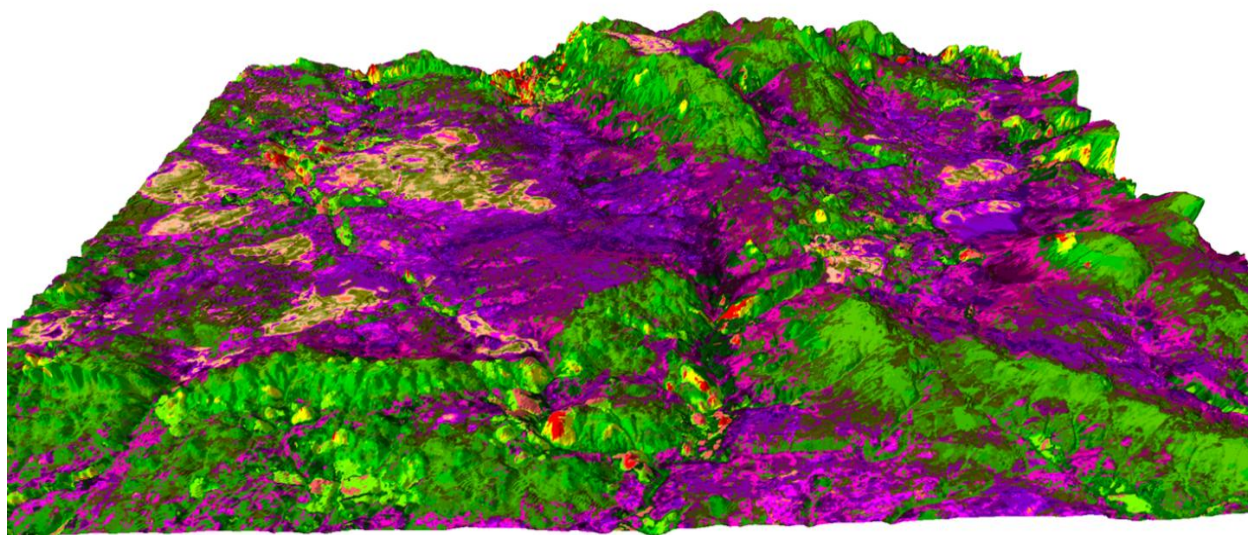


Рисунок 3.19 Трехмерная модель карты инвариантных состояний ландшафта (Для наглядности масштаб для отображения высот увеличен в 10 раз)

Растительность

В общей сложности, для составления легенды по характеристикам растительности использованы 3186 геоботанических описаний. На рисунке 4.20 представлено их распределение по классам. Больше всего описаний приходится на блок мелколиственно-хвойных и хвойных лесов, так как у специалистов ботаников, ландшафтоведов, работающих на территории Центрально-Лесного заповедника, в первую очередь вызывают научный интерес уникальные нетронутые рубками ельники, а не вторичные мелколиственные леса или антропогенные геосистемы такие как, сенокосы, селитебные земли и т.д. Еще одним фактором можно считать транспортную доступность, согласно рисунку 3.1, преимущественно все описание выполнены на территории южного лесничества. Большинство описаний болот сделано на верховом болоте Старосельский Мох, которое наиболее близко расположено к поселку, ввиду удачного расположения здесь производятся постоянные измерения на трансекте, установлена вышка для измерения потоков углерода методом турбулентных пульсаций, проходит экотропа. А на огромном верховом болоте Катин Мох, расположенном на северо-западе территории исследования, ввиду его удаленности почти нет описаний.

Относительно мало описаний в блоке лугов, сенокосов, селитьбы. Для увеличения их количества был проведен полевой сезон 2023 года. Были описаны луговые сообщества внутри и вблизи поселков Большое-Федоровское, Колесня, Высокое и Падоры.

Первоначально была выполнена количественная и на ее основе качественная легенда по средним значениям основных показателей (сомкнутость и высота древостоя, сумма площадей сечения древостоя и по видам – Приложение 4, 5; проективное покрытие травяно-кустарничкового и мохового яруса, а также для 3 групп мхов (долгомошники, зеленомошники и сфагнум)) – Приложение 6, 7. Однако, такой метод построения легенды оказался хоть и оперативным, но достаточно грубым, не во всех случаях можно опираться на средние значения на класс. Поэтому для каждого класса

были проанализированы гистограммы распределения основных характеристик растительности. На рисунке 4.21 представлены примеры гистограмм распределения СПС ели и березы для двух контрастных классов. Результаты корректировки легенды, выполненной на основе средних значений на класс, по анализу распределений отражены в итоговой легенде.

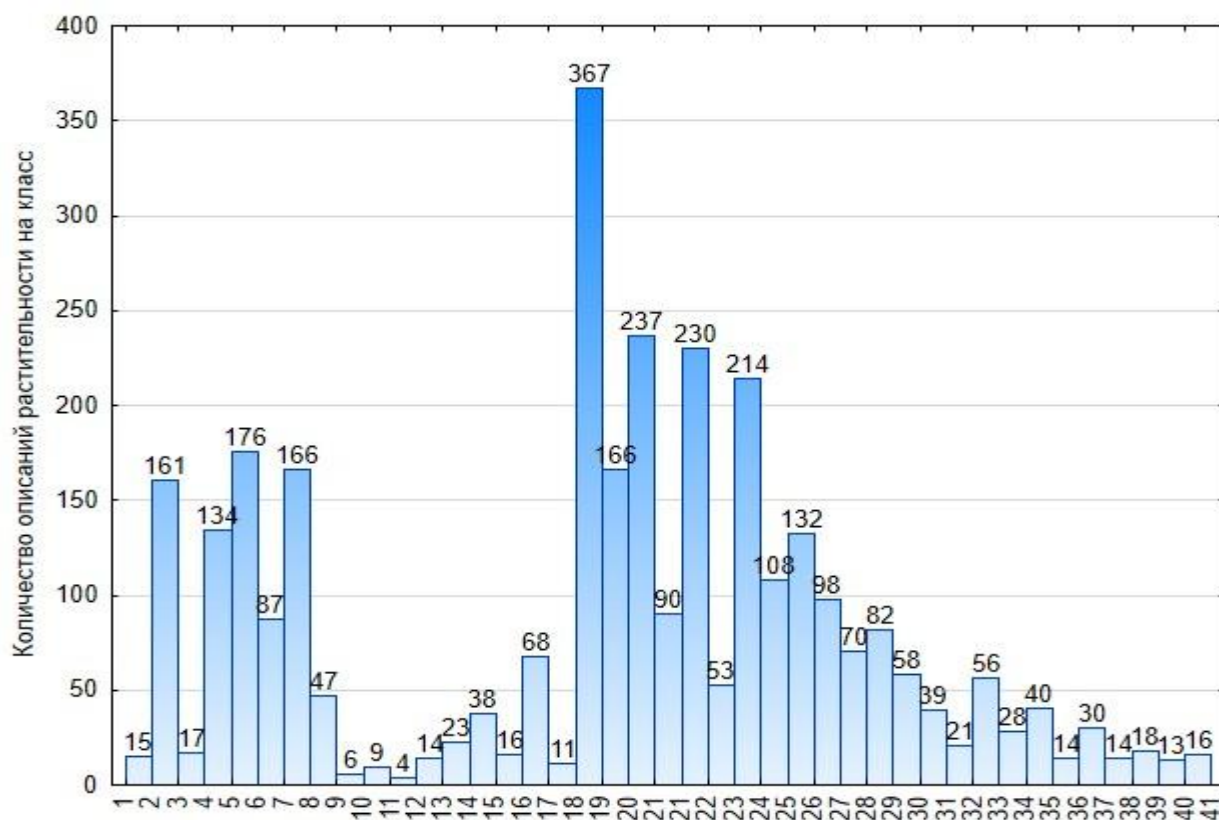


Рисунок 4.20 Количество описаний растительности, приходящихся на класс

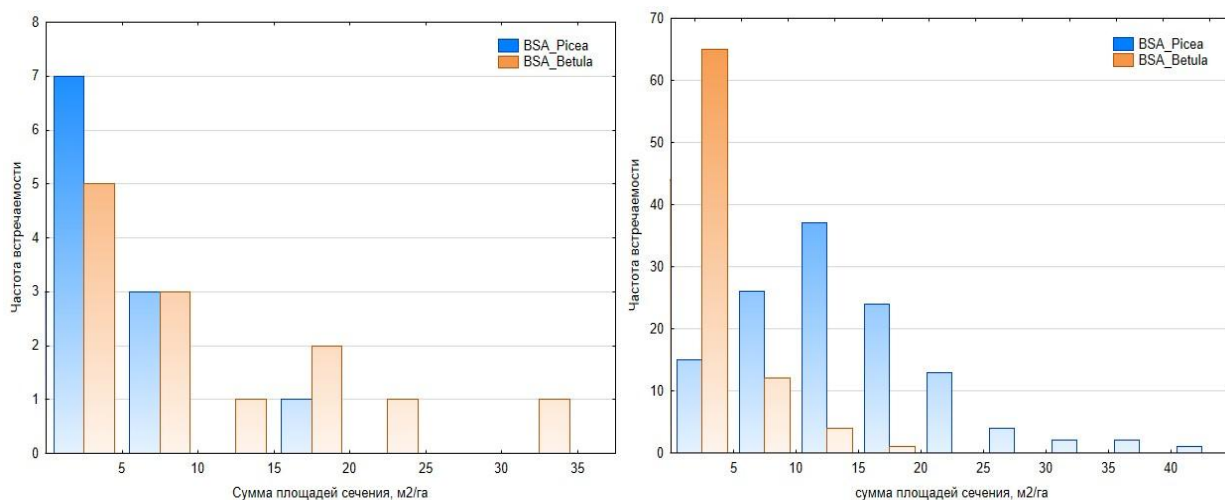


Рисунок 4.21 Гистограммы распределения суммы площадей сечения ели и березы для класса 1 и 26

Для характеристики травяно-кустарничкового яруса была выполнена легенда на основе преобладания класса растительности, выделенной с помощью классификации, основанной на анализе соотношения эколого-ценотических групп и доминантных видов (Приложение 8). С учетом того, что территория исследования является пограничной между таежной и зоной смешанных лесов (Макунина, 1985), наибольший интерес вызывает соотношение бореальных и неморальных видов. Например, влияние ландшафтных и сукцессионных факторов на соотношение данных эколого-ценотических групп было оценено для южно-таежных лесов заповедника Кологривский лес (Хорошев и др., 2013). На территории Центрально-Лесного заповедника в 2019 году был заложен трансект «Межа», на котором было исследовано, как группы ассоциаций растительности, выделенные по соотношению ЭЦГ, связаны с положением в рельефе, влажностью верхнего горизонта почвы и гранулометрическим составом. Установлено, что данные зависимости неоднозначны, не смотря на высокие показатели коэффициента регрессии, характеристики почвы и рельефа достоверно различают только влажнотравную и кустарничково-мелкотравно-сфагновую группу (Байбар и др., 2019).

Почва

В общей сложности, для составления легенды были использованы почти 2 тысячи почвенных описаний. Их распределение по классам представлено на рисунке 4.22. Наибольшее количество описаний приходится на средневысокие, среднеполотные ельники неморально-бореальные и заболоченные ельники сфагново-кустарничковые, наименьшее – на болотные и луговые комплексы.

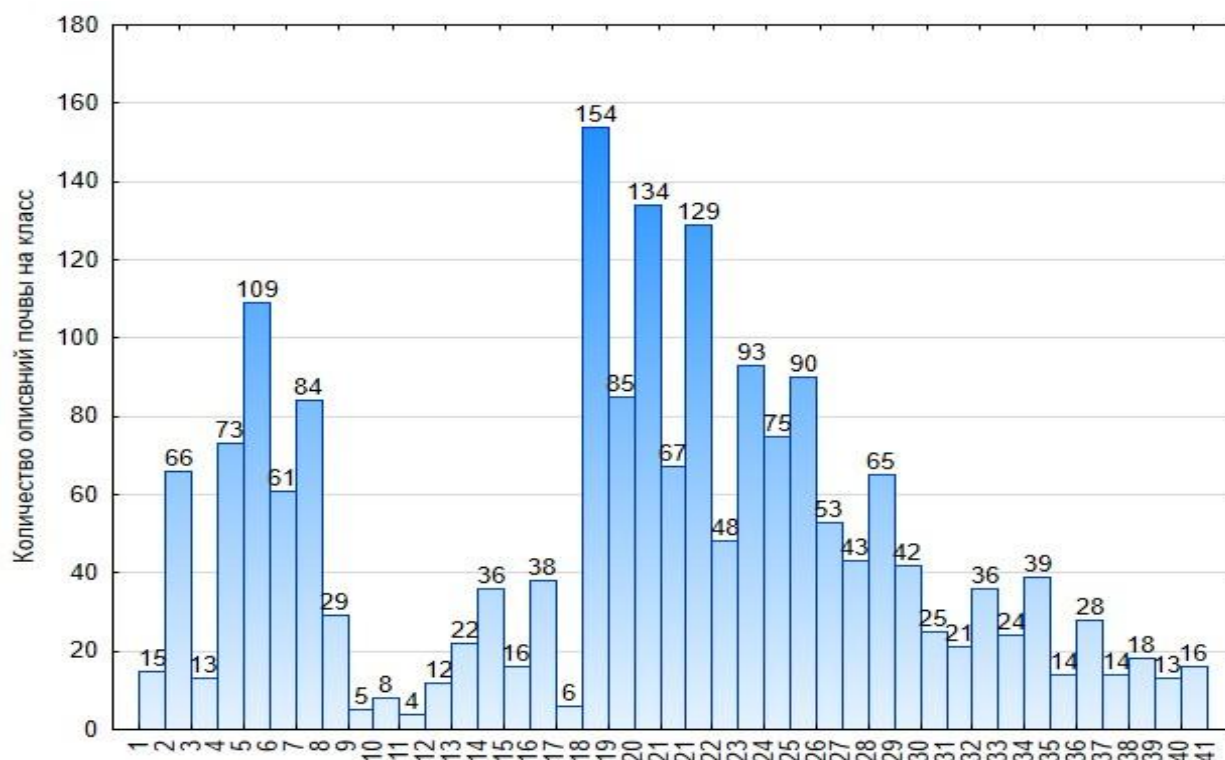


Рисунок 4.22 Количество почвенных описаний, приходящихся на класс

Для елово-мелколиственных и мелколиственных лесов на моренных грядах характерны преимущественно маломощные почвы, в среднем суммарная мощность горизонтов от А до В составляет 50 - 55 см (1-2, 4-6, 8 классы). Исключением являются березово-еловые и березово-осиново-еловые травянистые леса на среднемощных почвах (70 см) (3, 7, 30 – 33 класс). Для мелколиственно-еловых и еловых травянистых и неморальных лесов характерны мощные почвы (80 – 85 см) (17, 19 – 21, 28 класс), в то время как ельники бореальные произрастают преимущественно на среднемощных почвах (16, 18, 24 -25, 27, 29 класс). Самые маломощные почвы в пределах озерно-водноледниковых котловин у заболоченных сосняков и ельников кустарничково-сфагновых (22 и 23 класс). Мощные почвы формируются под луговой растительностью (38 – 41 класс) (Приложение 9).

По количеству почвенных генетических горизонтов на 1 метр меньше всего их у мелколиственных и елово-мелколиственных лесов моренных гряд (4 – 6, 8 класс), у лугов (38, 41 класс). Наибольшее количество у ельников богатовлажнотравно-неморальных (17 класс), бореальных (20, 26, 28 класс) и

у вторичных мелколиственно-еловых лесов с доминированием бореальных видов в травянистом ярусе (35 класс) (Приложение 9).

Согласно данным о реакции почвы с соляной кислотой, карбонатность почвы встречается во всех лесных и луговых классах преимущественно в средней части почвенного профиля (50 – 100 см). Почва вскипает ближе всего к поверхности у богатовлажнотравных лугов (40 – 41 класс) (Приложение 10).

Fe-Mn конкреции встречаются в почвах почти всех лесных и луговых классов, исключением является разреженные молодые сосняки травяно-сфагновые (15 класс). Ближе всего к поверхности Fe-Mn конкреции встречаются в елово-мелколиственных и еловых неморально-бореальных лесах (4, 7, 28 класс), елово-мелколиственных влажнотравно-бореальных лесах (8 класс), лугах (39 и 41 класс). Глубже всего железомарганцевые конкреции встречаются в ельниках и мелколиственно-еловых бореально-влажнотравных (16, 23, 32 класс) и бореальных лесах 35 класса (Приложение 10).

Оглеение как и наличие железомарганцевых конкреций и карбонатность присутствует повсеместно, кроме отдельных болотных классов и 39 лугового. Выше всего верхняя граница оглеения у ельников бореальных 19 – 21 классов, неморально-бореальных 28 класса, смешанных богатовлажнотравных лесов (31 класс), у елово-мелколиственных бореальных (37 класс), неморально-бореальных (36 класс) и влажнотравно-неморальных (34 класс) лесов (Приложение 10).

Мощности почвенных генетических горизонтов. Были рассмотрены мощности основных почвенных генетических горизонтов.

По мощности торфяного горизонта почвы дифференцируются на торфянисто-подзолистые почвы (4 – 5 класс), торфяно-подзолистые почвы (22, 26 – 27 класс), торфяные болотные почвы (23 класс).

По мощности гумусового горизонта лесные почвы преимущественно относятся к слабодерновым (мощность A1 менее 10 см), исключением являются почвы вторичных мелколиственных богатовлажнотравных лесов (30

– 32, 34 класс), где средние показатели мощности гумусового горизонта 13 – 17 см. Относительно глубокогумусированы почвы лугов, средняя мощность горизонта А1 более 20 см (38 – 41 класс).

Наиболее мощный переходный горизонт от гумусового к элювиальному у почв вторичных елово-мелколиственных неморальных лесов (2 – 3 класс), богатовлажнотравных (32 класс) и бореальных (35 – 36 класс), у мелколиственно-еловых богатовлажнотравных и влажнотравных лесов (16 – 17 класс), средняя мощность А1А2 составляет 8 – 9 см. Наименьшие мощности данного горизонта у дерново-подзолистых почв лугов (39 – 40 класс).

На территории исследования преобладают среднеподзолистые почвы, у вторичных елово-мелколиственных лесов неморально-бореальных (1, 4, 7, 36 класс), бореальных (37 класс) и богатовлажнотравных (31 класс), у ельников бореальных (18 – 20, 24 – 28 класс), влажнотравно-бореальных (29 класс). Оподзоливание отсутствует или очень слабое у почв 40 класса.

По мощности переходного горизонта А2В (от элювиального к иллювиальному) наибольшие значения данного показателя у почв смешанных бореально-влажнотравных лесов (16, 31 класс), ельников бореальных (19 – 21, 24 – 26 класс). Наименьшая мощность у почв заболоченных ельников бореально-влажнотравных (болотных) 23 класса.

Самый мощный иллювиальный горизонт у почв лугов (38 – 41 класс), и ельника богатовлажнотравно-неморального (17 класс), средняя мощность горизонта В составляет более 40 см. Самый маломощный у заболоченных ельников 23 класса и у вторичных елово-мелколиственных бореальных лесов 6 класса. В среднем мощность иллювиального горизонта лесных почв территории исследования варьирует от 30 до 40 см (Приложение 11).

Гранулометрический состав почвенных горизонтов. Гумусовый горизонт, как правило, имеет легкосуглинистый гранулометрический состав. Исключением является 4, 5, 18, 25, 26, 31, 37, 39 класс, у которого А1 имеет переходный состав от легкого суглинка к супеси. А также луговые 40 и 41 класс, 29 класс (ельники влажнотравно-бореальные), у которых

преимущественно супесчаный гумусовый горизонт, а 8 класс (мелколиственно-еловые влажнотравно-бореальные леса) имеет легко-среднесуглинистый состав горизонта A1.

Переходный горизонт от гумусового к элювиальному преимущественно легкосуглинистый-супесчаный. A1A2 легкосуглинистый у елово-мелколиственных лесов на моренной гряде (1 – 3 класс), у смешанных лесов богатовлажнотравных (16, 17, 29, 31, 32 класс), неморально-бореальных (30 класс), ельников бореальных (19 – 23, 28 класс), у вторичных елово-мелколиственных бореальных лесов (35, 36 класс) и у лугов 38 и 39 класса. Луга 40 и 41 класса имеют преимущественно супесчаный гранулометрический состав горизонта A1A2.

Элювиальный горизонт преимущественно легкосуглинистый-супесчаный, исключение ельники бореально-влажнотравные (16 класс), ельники бореальные (19, 21 класс), елово-мелколиственные бореально-богатовлажнотравные (32 класс) и неморальные (33 класс) леса, луга (38 класс) с легкосуглинистым гранулометрическим составом. Супесчаный состав A2 у ельников бореальных (18 класс), бореально-влажнотравных (болотного) (23 класс), у елово-мелколиственных влажнотравно-неморальных лесов 34 класса, лугов 39, 40, 41 класса.

Переходный горизонт A2B, как правило, легкосуглинистый. Более легкий гранулометрический состав (легкосуглисто-супесчаный) у елово-мелколиственных бореальных лесов 6 класса, и влажнотравно-бореальных 8 класса, мелкоколиственно-еловых бореальных 18 класса, у ельников бореальных (26, 27 класс) и влажнотравно-бореальных (29 класс), лугов 38 класса. Супесчаный состав горизонта A2B у мелкоколиственно-еловых лесов влажнотравных (17 класс), у ельников бореально-влажнотравных (болотных) (23 класс), вторичных елово-мелколиственных влажнотравно-неморальных (34 класс) и неморально-бореальных (36 класс), лугов 40 и 41 класса. У 39 класса горизонт A2B имеет переходный гранулометрический состав от супеси к мелкозернистому песку.

Иллювиальный горизонт В имеет более тяжелый гранулометрический состав, как правило или средний суглинок, или переходный между средним и легким суглинком. У луговых классов 40 и 41 гранулометрический состав горизонта В - мелкозернистый песок, у 39 класса – мелко-среднезернистый песок. Супесчаный состав иллювиального горизонта у ельников бореальных (18, 20, 22 -24, 26 класс). (супесь-легкий суглинок) У классов елово-мелколиственных бореальных лесов (5, 6 класс), и у ельников бореальных, бореально-влажнотравных (27, 28, 29 класс) горизонт В представлен переходным составом от супеси к легкому суглинку. Более тяжелый состав (тяжелый-средний суглинок) у елово-мелколиственных неморально-богатовлажнотравных (3 класс) и бореально-богатовлажнотравных лесов (32 класс), ельников богатовлажнотравно-неморальных (17 класс) и неморально-бореальных (21 класс).

Переходный горизонт ВС преимущественно имеет гранулометрический состав тяжелый-средний или средний суглинок. Однако, у елово-мелколиственных бореальных лесов (6 класс), ельников бореальных (22, 23, 26, 27) и у лугов (39 – 41класс) данный горизонт представлен супесью.

Горизонт С как и горизонт В преимущественно представлен тяжелым-средним суглинком, исключение 6, 40, 41 класс – средний-легкий суглинок, 23 класс– легкий суглинок, 26 класс – супесь.

Итак, можно сделать вывод, что для вторичных елово-мелколиственных лесов на моренных грядах характерны легко- и среднесуглинистые почвы, для ельников – более легкий гранулометрический состав элювиального и иллювиального горизонта, причем чем тяжелее состав иллювиального горизонта, тем больше у ельников преобладают неморальных видов травянистого яруса. Почвы лугов в отличии от лесных имеют более легкосуглинистый-супесчаный состав (Приложение 12).

Цвет почвенных горизонтов по шкале Манселла.

Окраска почв на территории исследования разнообразна и зависит как от почвообразующих пород, так и от особенностей протекания

почвообразовательных процессов. Несмотря на то, что определение цвета является достаточно субъективным процессом, исследование базируется на большом статистическом материале о характеристиках цвета по шкале Манселла, таким образом это позволило получить некоторую объективную информацию о дифференциации цвета генетических горизонтов почв различных классов.

Гумусовый горизонт. Ние горизонта A1 почти для всех классов соответствует 10YR, только у елово-мелколиственных влажнотрано-бореальных лесов 8 класса и лугов 40 и 41 класса характерно чуть больше красного оттенка (7,5YR). По светлоте доминирует показатели, соответствующие почти черному цвету (Value = 2, 3), исключение – елово-мелколиственные бореальные леса 6 класса, смешанные богатовлажнотравные леса 31 класса, луга 38 и 39 класса, у них горизонт A1 не черный, а больше темно-коричневый (Value = 4). По насыщенности цвета выделяются луговые классы (38 – 41), для них характерны более высокие показатели chroma (Приложение 13).

Переходный горизонт от гумусового к элювиальному. Дифференциации по оттенку горизонта A1A2 среди почв разных классов нет, у всех горизонтов Ние соответствует 10YR, Value - 4, только у 33, 34 класса (елово-мелколиственные неморальные и влажнотравно-неморальные леса) Value = 3, а для луговых 38, 40 класса характерен более светлый горизонт A1A2 (Value = 5). По показателю Chroma самый насыщенный цвет у елово-мелколиственных влажнотравно-бореальных лесов 8 класса, лугов 39 и 40 класса (Chroma > 4) (Приложение 13).

Элювиальный горизонт. В целом, окраска горизонта A2 соответствует светлому желтовато-коричневатому цвету (10YR 5/4). По степени светлости - цвет горизонта A2 чуть темнее среднего у почв мелколиственно-еловых богатовлажнотравно-неморальных лесов 17 класса (Value = 4), и светлее у почв елово-мелколиственных бореальных лесов 6 класса, ельников бореальных (23, 26 классов, лугов (40, 41 класс) (Value = 6). По насыщенности

выделяются елово-мелколиственные влажнотравно-бореальные леса 8 класса (Chroma = 8, насыщенный желтовато-коричневый цвет), леса 17, 20, 23, 27 класса (Chroma = 2, серовато-коричневый цвет) (Приложение 13).

Переходный от элювиального к иллювиальному горизонту. Горизонт A2B, как правило, имеет желтовато-коричневый цвет (Hue = 10YR), чуть больше красного оттенка у елово-мелколиственных бореальных лесов 6 и 36 класса, а также у лугов 40 и 41 класса (Hue = 7,5YR). По светлости доминирует показатель Value равный 5, чуть темнее данный горизонт у бореально-влажнотравных ельников (16 класс), у елово-мелколиственных неморальных (33 класс), влажнотравно-неморальных лесов (34 класс), неморально-бореальных (36 класс), у лугов 39 и 40 класса. По показателю Chroma, самые насыщенные цвета у почв елово-мелколиственных лесов (4-6, 8, 31, 33, 35 класс), ельников богатовлажнотравно-неморальных (17 класс), бореальных (22 – 24, 28 класс) и лугов (39 – 41 класс) (Приложение 14).

Иллювиальный горизонт. По оттенку цвета горизонта В дифференциации между почвами разных классов нет, везде доминируют показания Hue равные 7,5YR. В среднем показатель светлости равен 4, исключением является почвы елово-мелколиственных преимущественно бореальных лесов (5 – 7 класс) и ельников бореальных (22 и 26 класс), для которых характерно чуть более светлый иллювиальный горизонт. В среднем показатель насыщенности равен 6, горизонт В насыщенного коричневого цвета. Более тусклый цвет иллювиального горизонта (Chroma = 4) у почв мелколиственных лесов неморальных-богатовлажнотравных (3 класс), неморально-бореальных ельников (21 класс), лугов 39 класса. И более насыщенный – у елово-мелколиственных бореальных лесов (5 – 7 класс), ельников бореальных (22 и 26 класс) (Приложение 14).

Горизонт почвообразующей породы. Наибольшая дифференциация по оттенкам цветов у горизонта С. Преобладают цвета группы 7.5YR, однако, встречаются более сероватые 10YR (1, 5, 6, 12, 13, 15, 22, 32 класс) и более красные 5YR (2, 16, 20, 39, 40 класс). А также встречаются цвета желтого без

красного оттенка 2,5Y (17 класс), 5Y (9 – 11, 14, 23 класс), 10Y (13 класс). По показателю Value преобладают почвы с показателем 4, только у елово-мелколиственных бореальных лесов 5 класса и ельников влажнотравно-бореальных 16 класса данный показатель равен 5 (чуть светлее). По насыщенности цвета выделяются почвы ельников бореальных (21, 22 и 23 класс), мелколиственных и елово-мелколиственных вторичных лесов 2, 6, 8 класса, для которых характерен ненасыщенный коричневый цвет горизонта С. Таким образом, по цвету горизонта С можно судить о почвообразующей породе (Приложение 14).

Проанализировав распределения 3 характеристик цвета почвенных генетических горизонтов по шкале Манселла (Hue - оттенок, Value – светлость, Chroma – насыщенность), удалось разделить почвы по интенсивности протекания основных почвенных процессов, характерных для территории исследования (гумусового, оподзаливания, оглеения) (Приложение 13, 14).

Температура приземных слоев атмосферы.

Для верификации классов инвариантных состояний были использованы инварианты температуры за летний и зимний период, рассчитанные по снимкам Landsat с 1987 по 2019 год. В зимнее время наиболее холодными являются классы лугов, сенокосов, населенных пунктов (38 – 41 класс), чуть менее холодные – грядово-мочажинные комплексы верховых болот (9 – 11, 14 - 15 класс). Относительно холодные – мелкие разреженные сосняки по окраинам болот (12 – 13 класс). А наиболее теплые – высокополнотные сильно сомкнутые старовозрастные еловые леса (22 – 29 класс). В летние месяцы наибольшие температуры приземного слоя воздуха зафиксированы у 9 – 11 классов (открытые верховые болота и разреженные молодые сосняки по окраинам болот). На 0.5°C - 1°C холоднее классы лугов (38 – 41 класс). При этом, чем больше зарастают луга, тем ниже температура. Если в классе отмечается наличие елового подроста, то разница может составлять 2°C по

сравнению с аналогичным лугом, на котором не началось восстановление ели (37 и 38 класс). Аномальным по температуре является 12 класс -окраина болот с выходом грунтовых вод, в бесснежный период это оказывает охлаждающий эффект, в зимний – отепляющий. (Приложение 15).

Интегральная легенда.

Проанализировав количественные и качественные характеристики классов, представленные в Приложениях 1 – 15, была составлена традиционная легенда на уровне урочищ и доминантных фаций (Таблица 4.12).

Таблица 4.12 Интегральная легенда к карте инвариантных биогеофизических состояний

Вторичные мелколиственные и хвойно-мелколиственные леса	Грядово-холмистая преимущественно славодреннированная моренная равнина	
	1	Возвышенные, относительно выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной, под вторичными мелколиственными неморально-бореальными лесами на дерново-слабоподзолистых почвах
	2	Средневысотные, слабовыпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной, под вторичными елово-мелколиственными неморально-бореальными лесами на дерново-слабоподзолистых почвах
	3	Возвышенные, слабовыпукло-вогнутые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной, под вторичными елово-мелколиственными неморально-богатовлажнотравными лесами на дерново-среднеподзолистых почвах
	4	Средневысотные, относительно плоские и слабовыпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной, под вторичными елово-мелколиственными (неморально)-бореальными лесами на дерново-средне(сильно)подзолистых почвах
	Слабо холмисто-грядовая неравномерно дренированная моренно-(озерно)водноледниковая равнина	
	5	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под вторичными елово-мелколиственными бореальными лесами на дерново-слабоподзолистых и подзолистых почвах

Верховые болота	6	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми бореальными лесами на торфяно-подзолистых и торфяных глееватых почвах
	7	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми и елово-мелколиственными (неморально)-бореальными лесами на дерново-среднеподзолистых почвах
	8	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под елово-мелколиственными влажнотравно-бореальными лесами на подзолистых и торфянисто-подзолистых почвах
	Слабоволнистая замедленно дренированная моренно-водноледниковая равнина	
	9	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под верховыми болотами на торфяной почве со средней мощностью 3 м
	10	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под верховыми болотами с молодыми разреженными сосняками на торфяной почве со средней мощностью 2 м
	11	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под верховыми болотами на торфяной почве со средней мощностью 4 м
	12	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под верховыми болотами с молодыми разреженными сосняками на торфяной почве со средней мощностью 3 м
	13	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под верховыми болотами с молодыми разреженными сосняками на торфяной почве со средней мощностью 3 м
	14	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под верховыми

Мелколиственно-хвойные и хвойные леса		болотами с молодыми разреженными сосняками на торфяной почве со средней мощностью 3,5 м
	15	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под верховыми болотами на торфяной почве со средней мощностью 2,5 м
	Слабоволнистая неравномерно дренированная моренно-водноледниковая равнина	
	16	Средневысотные, относительно слабонаклонные поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под широколиственно-мелколиственно-еловыми бореально-влажнотравными лесами на дерново-слабоподзолистых почвах
	17	Средневысотные, относительно слабонаклонные поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми богатовлажнотравно-неморальными лесами (с участием ив) на дерновых и дерново-слабоподзолистых почвах
	18	Средневысотные, относительно слабонаклонные поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под широколиственно-мелколиственно-еловыми бореальными лесами на дерново-слабо(средне)подзолистых почвах
	19	Относительно пониженные, слабонаклонные поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми бореальными лесами на дерново-средне(сильно)подзолистых почвах
	20	Относительно пониженные, слабонаклонные поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под широколиственно-мелколиственно-еловыми бореальными лесами на дерново-среднеподзолистых почвах
Мелколиственно-хвойные и хвойные леса	21	Относительно пониженные, слабонаклонные поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми (преимущественно осиново-еловыми) (неморально)-бореальными лесами на дерново-слабо(средне)подзолистых почвах
	Слабоволнистая заболоченная моренно-озерно-водноледниковая равнина	

Ме лк ол	22	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-хвойными (преимущественно березово-сосново-еловыми и березово-еловыми) и хвойными бореальными лесами на торфянисто- и торфяно-подзолистых глееватых (глеевых) почвах
	23	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под сосновыми бореально-влажнотравными, заболоченными лесами на торфяных почвах со средней мощностью 1,5 м
	24	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми бореальными лесами на дерново-слабо(средне)подзолистых почвах
	25	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми бореальными лесами на дерново-средне(сильно)подзолистых почвах
	26	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под ельниками бореальными (нередко с участием осины) на торфянисто-подзолистых почвах
	27	Относительно пониженные, очень плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками и песками, под ельниками бореальными на торфяно-подзолистых глееватых почвах
	28	Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми (неморально)-бореальными лесами на дерново-среднеподзолистых почвах
	29	Относительно пониженные, слабовогнутые и плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под ельниками влажнотравно-(неморально)-бореальными на дерново-слабо(средне)подзолистых почвах
Ме лк ол	Грядово-холмистая преимущественно слабодренированная моренно-водноледниковая равнина	

	30	Относительно пониженные, слабовогнуто-выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной, под мелколиственными (неморально)-бореальными лесами (березняки и сероольшанники) на дерновых и дерново-слабоподзолистых почвах
	31	Относительно пониженные, слабонаклонные поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной, под мелколиственно-еловыми богатовлажнотравными лесами (с участием клена, ивы) на дерново-слабоподзолистых почвах
	32	Относительно пониженные, слабовогнутые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной, под мелколиственными (сероольшанники, ивняки) бореально-богатовлажнотравными лесами на дерновых и дерново-слабоподзолистых почвах
	33	Средневысотные, слабовогнуто-выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной, под мелколиственными неморальными лесами с участием широколиственных видов (вяз, липа) на дерново-слабоподзолистых почвах
	34	Относительно пониженные, слабовогнуто-выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной, под мелколиственными влажнотравно-неморальными лесами (ивняки, сероольшанники, березняки) на дерново-слабо(средне)подзолистых почвах
	35	Относительно пониженные, слабовогнуто-выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной, под мелколиственно-еловыми (осиново-березово-еловыми и осиново-еловыми) бореальными лесами на дерново-среднеподзолистых и подзолистых почвах
	36	Относительно пониженные, слабовогнуто-выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками и песками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками, под мелколиственно-еловыми (неморально)-бореальными лесами на дерново-средне(сильно)подзолистых почвах
Лу га	37	Относительно пониженные, слабовогнуто-выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под мелколиственно-еловыми бореальными лесами на дерново-(средне)сильноподзолистых почвах
	38	Относительно пониженные, слабовыпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и

		водноледниковыми суглинками и песками, под лугами на агродерновой почве
	39	Средневысотные, выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под лугами на агродерновой слабоподзолистой почве (пашни, пастбища, сенокосы, молодые вырубки)
	40	Средневысотные, выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под богатовлажнотравными лугами на агродерновой почве (пашни, пастбища, сенокосы, молодые вырубки)
	41	Средневысотные, выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под лугами (богатовлажнотравными) на агродерновой почве (преимущественно селитебные земли)

Заключение

Как было сказано ранее, первая трактовка термина инвариант ландшафта (геосистемы) была сделана Виктором Борисовичем Сочавой, однако на тот момент не была сформулирована единая методика его выделения, так же отсутствовали достаточно полные временные ряды наблюдений, на основе которых можно было бы его выделить. Все это привело к тому, что достаточно длительный промежуток времени в отечественной ландшафтной школе использовали статическую трактовку, под инвариантом подразумевали устойчивую горизонтальную или вертикальную структуру. При этом, в данном понимании, ведущее значение отводится наиболее устойчивым инертным компонентам ландшафта, таким как горные породы или почва, что отчетливо прослеживается в работах Федора Николаевича Милькова и его последователей. Принципиально новый виток в изучении инвариантов ландшафта связан с развитием представлений о ландшафте как о сложной динамической системе, которые развивала команда под руководством Юрия Георгиевича Пузаченко, а также благодаря доступности новых технических возможностей. Таким образом, все это способствовало формулировке новой трактовки термина, в которой инвариант ландшафта понимается как параметр порядка сложной нелинейной системы и имеет реальный физический смысл (Байбар и др., 2023).

Понятие параметра порядка как совокупность ограниченного числа независимых переменных, отражающих всевозможное разнообразие состояний системы, детально разработано Германом Хакеном в синергетике при анализе работы головного мозга. Им показано, что основной метод их получения – метод главных компонент. Анализ зарубежной литературы различных отраслей науки: экономики, физики, социологии, биологии и т.д. - показал, что данный метод универсальный и может быть применен для выделения параметров порядка различного рода систем: физических, биологических, технических, социальных и т.д. Метод главных компонент нашел порядка 5 – 6 направлений применения в географии, одно из которых,

это обработка пространственных данных, получаемых со спутника. А накопление мультиспектральных данных за разные сроки наблюдения позволило выделять устойчивые состояния не только в пространстве, но и во времени.

Для территории заповедника собран временной ряд наблюдений за состояниями ландшафта со съемочной системы спутников Landsat длиной более чем в 35 лет (с 1987 года). Методом главных компонент выявлено, что от 94 до 100% основных каналов каждой сцены Landsat (кроме длинноволнового) описывается тремя компонентами, характеризующими ландшафтный покров: 1. общая яркость, тождественна количеству биомассы, 2. яркость ближнего инфракрасного канала, отражающая интенсивность протекания фотосинтеза, 3. яркость коротковолновых инфракрасных каналов, связанная с содержанием свободной воды. При этом, прослеживается сезонная динамика по соотношению данных компонентов, в летний бесснежный период ведущее значение имеет яркость в ближнем инфракрасном канале, в то время как в период снеготаяния (вторая декада апреля) – яркость коротковолновых инфракрасных каналов.

Обобщение полученных трех основных компонент за все сроки наблюдения позволяет получить частные инварианты яркости всех каналов (биомассы), ближнего инфракрасного (фотосинтеза) и коротковолновых инфракрасных каналов (влажности) за 35 лет наблюдений за территорией исследования.

Общий инвариант яркости всех каналов описывает около 70% варьирования значений яркости за рассматриваемый временной промежуток. Таким образом, данный частный инвариант отражает дифференциацию территории по количеству биомассы в течение всего календарного года, выделяет территории с наибольшим отражением (наименьшей биомассой) и с наименьшим отражением (наибольшей биомассой) как в зимний, так и в летний период. Низкими значениями выделяются старые высокополнотные

ельники, высокими - верховые болота, сельскохозяйственные угодья, селитебные земли.

Обобщение компонент ближнего инфракрасного канала за все сроки наблюдения позволяет получить общий (для всего календарного года) и сезонный частный инвариант интенсивности протекания фотосинтеза. При этом, ведущее значение имеет сезонный инвариант, который описывает чуть больше 40% варьирования яркости в ближнем инфракрасном канале за все сроки наблюдения. На нем противопоставляются территории с активным протеканием фотосинтеза в осенне-весенний период и в летние месяцы, то есть, выделяются территории, которые раньше всех высвобождаются от снежного покрова, в первую очередь это верховые болота. На общий частный инвариант фотосинтеза приходится около 20% варьирования значений за все сроки. По нему отчетливо прослеживается дифференциация лесов по активности протекания фотосинтеза в период общего максимума. Наибольшая активность данного процесса у вторичных мелколиственных лесов на центральной меридионально вытянутой гряде, чуть менее продуктивны ельники неморальные с участием мелколиственных и широколиственных видов, самая низкая активность фотосинтеза у старых заболоченных ельников на озерно-водноледниковой равнине. Совместно 2 частных инварианта фотосинтеза описывают более 60% варьирования компонент ближнего инфракрасного канала за 35 лет.

Обобщение компонент коротковолновых инфракрасных каналов за все сроки позволяет получить 3 частных инварианта, отражающих количество свободной воды в ландшафтном покрове. Первый инвариант описывает все сроки наблюдения, кроме периода снеготаяния в апреле. Он выделяет относительно сухие сельскохозяйственные земли, вторичные леса на вершинах и склонах моренных гряд и противопоставляет им верховые болота, заболоченные ельники, сосново-еловые леса. Второй сезонный инвариант выделяет сильно обводненные территории в весенний период, при низком их обводнении в летние месяцы. Третий частный инвариант первой и второй

декады апреля отражает содержание влаги в период половодья. Совместно три инварианта описывают около 55% варьирования компоненты коротковолновых инфракрасных каналов за все сроки наблюдения.

Обобщение частных инвариантов показало, что они не являются ортогональными, взаимонезависимыми, в отличие от компонент для каждого срока наблюдения. В результате, применение метода главных компонент относительно 6 частных инвариантов позволяет получить 3 общих инварианта. Первый общий инвариант отражает количество биомассы, активность протекания фотосинтеза в течении всего года и отрицательно связан с сезонным варьированием содержания свободной влаги в ландшафте. Высокими значениями выделяются территории с низкой биомассой, но активным протеканием фотосинтеза, в первую очередь это открытые участки, такие как луга, верховые болота, вторичные мелколиственные леса, низкими значениями – еловые высокополнотные леса со слабым протеканием фотосинтеза, поздним наступлением весеннего снеготаяния.

Второй общий инвариант положительно связан с влажностью в течении всего года и отрицательно с сезонным протеканием фотосинтеза. Высокими значениями выделяются наиболее дренированные территории с активным протеканием фотосинтеза в летние месяцы, это характерно для сельскохозяйственных земель, молодых вторичных мелколиственных лесов на моренных грядах. Низкие значения характерны для верховых болот, заболоченных бореальных ельников, сосняков – высокое влагосодержание в течении всего года, низкая интенсивность фотосинтеза в летние месяцы.

Третий общий инвариант в наибольшей степени определяется влагосодержанием в период снеготаяния, а также активностью протекания фотосинтеза для всего года. Набольшими значениями выделяются зарастающие вырубки, сельскохозяйственные земли, луга, еловые леса - низкое влагосодержание в первую и вторую декаду апреля и слабый фотосинтез в течении всего года. Низкими значениями маркируются верховые болота, мелколиственные и хвойно-мелколиственные леса на моренных

грядках, так как для них характерно высокое влагосодержание и активное протекание фотосинтеза в первой половине апреля.

Совместно общие инварианты описывают около 70% варьирования значений частных инвариантов. Семантика получаемых инвариантов определялась на основе полевых описаний и данных о рельефе. Результаты мультирегрессионного анализа показали, что ведущее значение имеют характеристики растительного покрова, в первую очередь, древесного яруса. Морфометрические параметры рельефа и характеристики почв слабо описывают пространственную структуру инвариантов отражения.

Аналогичные результаты были получены при обобщении термодинамических переменных, рассчитанных для территории Центрально-Лесного заповедника с 1986 по 2009 год. Были получены 3 инварианта: первый связан с поглощением солнечной энергии в течение всего года, второй – с продуктивностью в вегетационный период и третий – с продуктивностью в весенне-осенний период (Sandlerskiy, Krenke, 2020).

Итак, результаты последовательного обобщения сцен Landsat на территорию Центрально-Лесного заповедника и его окрестностей за последние 35 лет показали, что система отражения мультиспектральных данных от деятельной поверхности земли определяется тремя независимыми координатами, в рамках которых выделяются устойчивые в пространстве и во времени основные аттракторы системы: еловые леса, вторичные мелколиственные и хвойно-мелколиственные леса, верховые болота, луга.

Шесть ландшафтных инвариантов (3 основных и 3 доописывающих) были получены путем интеграции 3 инвариантов мультиспектральных данных Landsat и 12 параметров порядка рельефа, полученных при обобщении 91 морфометрической характеристики на разных иерархических уровнях. Первый и шестой ландшафтный инвариант выделяет склоны речных долин, моренных гряд и холмов, для которых характерно относительно высокие значения крутизны склонов, низкое влагосодержание в течение всего года и активное протекание процесса фотосинтеза в летние месяцы. Им

противопоставляются верховые болота и заболоченные ельники на плоской поверхности озерно-водноледниковой равнины с переувлажнением в течение всего года, с активным протеканием фотосинтеза только в весенние месяцы.

Второй и пятый ландшафтный инвариант выделяют территории с активным фотосинтезом на вершинах и преимущественно южных склонах моренных гряд, с маленьким количеством биомассы и влагосодержанием в первой половине апреля и с высоким в летние месяцы. (суходольные луга и верховые болота). Им противопоставляются леса, произрастающие на вогнутых поверхностях северных, северо-восточных и восточных склонов моренных гряд, и речные долины – высокое влагосодержание в апреле и низкое летом, большое количество биомассы и слабое протеканием фотосинтеза.

Третий и четвертый ландшафтный инвариант выделяют участки с низкой интенсивностью протекания фотосинтеза и малым влагосодержанием, но с большими значениями биомассы на вогнутых формах микро- и мезорельефа с преимущественно СВ и З экспозицией – склоны гряд и речных долин. Им противопоставляются верховые болота, для которых характерен активный фотосинтез, высокое влагосодержание, маленькая биомасса.

Сопоставление ландшафтных инвариантов с полевыми описаниями растительности и почвы, данными о рельефе показало, что полученные инварианты имеют физический смысл и могут послужить основой для автоматизированного ландшафтного картографирования на основе дихотомической классификации. В результате ее применения был выделен 41 класс, который условно можно разделить на 5 крупных блоков: 1 – вторичные мелколиственные и хвойно-мелколиственные леса, произрастающие на моренных грядках, 2 – верховые болота на вогнутых склонах моренных гряд, 3 – леса с преобладанием ели на моренно-озерно-водноледниковой равнине, 4 – вторичные молодые мелколиственные леса, примыкающие к жилым населенным пунктам на склонах моренных гряд, 5 – луга (луга, селитьба, вырубки, сенокосы и т.д.) на моренных грядках. Каждый класс можно

охарактеризовать по средним и медианным значениями основных характеристикам рельефа, растительности и почвы, интерпретация которых позволяет построить традиционную легенду к ландшафтной карте.

Выводы

Проведя данное исследование, были сделаны следующие выводы:

1. От 94% до 100% варьирования значений исходных каналов сцен Landsat может быть описано 3 компонентами снимков, в первую очередь отражающих надземную биомассу (общая яркость), интенсивность протекания фотосинтеза (яркостью в ближнем ИК канале), количество свободной воды в ландшафте (яркость в коротковолновых ИК каналах). Выявлена сезонная динамика соотношения компонент ближнего ИК и коротковолновых ИК каналов.
2. На основе ограниченного количества безоблачных спутниковых снимков при помощи последовательного обобщения методом главных компонент мультиспектральной дистанционной информации, получаемой съемочной системой Landsat, можно выделить относительно устойчивые пространственно-временные инварианты отражения территории за рассматриваемый временной интервал.
3. Двенадцать параметров порядка рельефа описывают 73% всех значений 10 морфометрических характеристик рельефа для 9 иерархических уровней рельефа. Таким образом, применение метода главных компонент позволило уменьшить количество переменных с минимальной потерей информации (менее 30%).
4. Получено 6 ландшафтных инварианта (три основных и 3 зеркальных, дописывающих нелинейные зависимости) на основе обобщения 3х интегральных инвариантов мультиспектральной информации и 12 параметров порядка рельефа. Установлена их статистически значимая связь с характеристика полевых описаний.
5. При помощи дихотомической классификации на основе ландшафтных инвариантов получена карта инвариантных состояний ландшафта с 41 классом, для которых выполнена семантическая интерпретация по полевым данным и характеристикам рельефа.

Итак, благодаря накоплению дистанционной мультиспектральной информации за 35 лет, удалось на практике проверить теоретическую базу, основы которой были заложены Виктором Борисовичем Сочавой еще в 80-х гг. XX века, но не были реализованы в полной мере ввиду отсутствия технических возможностей. Таким образом, в работе продемонстрирована методика постепенного обобщения основных каналов сцен Landsat, приводящая к получения ландшафтной карты инвариантных состояний, охватывающих относительно длительный промежуток времени.

Список литературы

1. Антонов С.И., Рычагов Г.И., Судакова Н.Г. Среднеплейстоценовые оледенения Центра Русской равнины: проблемы стратиграфии и палеогеографии//Бюл. Комис. по изуч. четвертич. Периода. – 2004. – № 65. – С. 5-16.
2. Байбар А. С., Пузаченко Ю. Г., Сандлерский Р. Б. Температурное поле южно-таежного ландшафта // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов. Материалы XIII Международной ландшафтной конференции, посвященной столетию со дня рождения Ф.Н. Милькова. / Под ред. А. В. Хорошев. Т. 1. ИСТОКИ, Воронеж, 2018. – С. 300–302.
3. Байбар А.С., Пузаченко М.Ю., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н. Картографирование растительного покрова на основе многомерного анализа мультиспектральных данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа // Материалы Международной научной конференции Картографирование биоты: традиции и актуальные вопросы развития. Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН Иркутск. – 2023а. – С. 9–12.
4. Байбар А.С., Пузаченко М.Ю., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н. Ландшафтные инварианты – параметры порядка динамической системы // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023б. – Т. 87. – № 3. – С. 370–390.
5. Байбар А.С., Пузаченко М.Ю., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н. Определение пространственно-временных инвариантных состояний ландшафтного покрова (на примере Центрально-Лесного заповедника и прилегающей территории) // Материалы XIV Международной ландшафтной конференции «Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии VII Мильковские чтения. — Т. 1. — Воронеж: Изд-во ВГУ, 2023в. — С. 72–75.
6. Байбар А.С., Черненко Т.В., Пузаченко М.Ю., Беляева Н.Г. Соотношение и факторы континуальности и дискретности растительного покрова на примере южно-таежных ландшафтов Валдайской возвышенности // Принципы экологии. – 2020. – № 3. – С. 4–15.
7. Бевз В.Н. Инвариантный аспект пространственно-временной организации склоновых ландшафтов //Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. география и геоэкология. – 2002. – №. 1. – С. 48-52
8. Большаков А.Г. Основы теории градостроительства и районной планировки // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования" Иркутский национальный исследовательский технический университет". – 2004. – 216 с.

9. Бородин О.И., Бугай А.С., Гихман И. И. Биографический словарь деятелей в области математики // Рад. школа. – 1979. – 607 с.
10. Боч С. Г., Краснов И. И. Классификация объектов геоморфологического картирования и содержание общих геоморфологических карт // Сов. геология. – 1958. – Т. 2. – С. 27-50.
11. Буданов В.Г. Метод ритмокаскадов: о фрактальной природе времени эволюционирующих систем // Синергетика, В.2, М.:Из-во МГУ. – 1999.
12. Васенев И.И., Таргульян В.О. Ветровал и таежное почвообразование (режимы, процессы, морфогенез почвенных сукцессий). М.: Наука. – 1995. – 247 с.
13. Васильев И.С. и др. Устойчивость криогенных ландшафтов на северном участке трассы железной дороги Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2009. – № 2. – С. 4 – 8
14. Васильев Л.Н. Фрактальность и самоподобие природных пространственных структур // Известия АН СССР. Сер. Геогр. – 1992. – № 5. – С. 25-36.
15. Величко А.А., Писарева В.В., Фаустова М.А. Оледенения и межледниковья Восточно-Европейской равнины в раннем и среднем плейстоцене // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2005. – Т. 13. – № 2. С. 84-102
16. Визгин В. П. Развитие взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения в классической физике. М.: Наука. – 1972. – 240 с.
17. Гончарук Н. Ю. Почвенная карта заповедника и закономерности пространственного размещения почв // Труды Центрально-Лесного заповедника. – 2007. – №. 4. – С. 195-219.
18. Горбунов Р. Функционирование и динамика региональных геоэкосистем в условиях изменения климата (на примере Крымского полуострова). – 2023. – 191 с.
19. Горшков М.В. Экологический мониторинг. Учеб. пособие. 2-е изд. испр. и доп. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ. – 2010. – 300 с.
20. Дмитриев В. В., Огурцов А. Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2012. – №. 3.
21. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Изд-во «РХД», М., Ижевск, 2001. - С. 29-47.
22. Заррина Е.П., Квасов Д.Д., Краснов И.И. Схематическая карта поясов краевых образований и позднечетвертичных приледниковых озер Европейской части СССР и прилегающих зарубежных территорий: масштаб 1:2 500 000. М.: ГУГК. – 1965.

23. Зорина А.А., Шуйская Е. А. Причины смещения сроков сезонных явлений у животных Центрально-Лесного биосферного заповедника // Самарский научный вестник. – 2020. – Т. 9. – №. 3 (32). – С. 67-72.
24. Зорина А.А., Шуйская Е.А., Куракина И.В., Волков В.П., Огурцов С.С., Степанов С.Н. Климатические причины смещения сроков цветения растений в Центрально-Лесном заповеднике // Поволжский экологический журнал. – 2020. – № 1. – С. 52–65. DOI: 10.35885/1684-7318-2020-1-52-65.
25. Исаченко А. Г. Ландшафты СССР. Л.:Изд-во Ленинигр. ун-та. – 1985. – 320 с
26. Карпачевский Л.О., Строганова М.Н. Почвы Центральнолесного заповедника и их экологическая оценка // Динамика, структура почв и современные почвенные процессы. Сборник научных трудов ЦНИЛ Главохоты РСФСР. М.: ЦНИЛ. – 1987. – С. 10-29
27. Карпов В.Г. Растительный покров. В кн.: Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги. Л.: Наука. – 1973.
28. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М. – 1976.
29. Коберниченко В. Г., Тренихин В. А. Методы синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – №. 4. – С. 22-31
30. Котлов И.П., Пузаченко Ю.Г. Структура рельефа русской равнины как ландшафтообразующего фактора // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология: труды Международной школы-конференции “Ландшафтное планирование”. М.: Изд-во МГУ. – 2006
31. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука. – 1979. – 282 с.
32. Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г., Пузаченко М.Ю. Пространственная организация регионального мезоклимата. Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – №3. – С. 116-130. <https://doi.org/10.31857/S2587-556620193116-130>
33. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. М.: Мир. – 1988. – 343 с.
34. Куприянова Т. П. Обзор представлений об устойчивости физико-географических систем // Устойчивость геосистем. М.: Наука. – 1983. – С. 7.
35. Курбанов Э. А. и др. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – №. 1 (21). – С. 18-32.
36. Куулар Х. Б. Оценка гарей Уюкского хребта на основе данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №. 4. – С. 239-244

37. Ласточкин А.Н. Основы общей теории геосистем: учебное пособие в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та. – 2016. – 132 с
38. Летопись природы Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Книга 60 (2020). Архив заповедника (Рукописи). Заповедный: Центрально-Лесной государственный заповедник. – 2020. – 367 с.
39. Летопись природы Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Книга 62 (2022). Архив заповедника (Рукописи). Заповедный: Центрально-Лесной государственный заповедник. – 2022. – 394 с.
40. Лехт Э.Е., Гудкова В.Н. Геоморфология и гляциоморфология; пояснительная записка к карте масштаба 1:500 000 // Серия карт «Природные ресурсы Калининской области». М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – 1986. – 135 с.
41. Литинский П. Ю. Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов. – 2007. – 149 с.
42. Макунина А.А. Физическая география СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та. – 1985. – 256 с.
43. Макунина Г. С. Геофизические системы ландшафтов //География и природные ресурсы. – 2011. – №. 4. – С. 5-11
44. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований. – 2002. – 656 с.
45. Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. – 1990. – С. 164-211.
46. Мерзляк М.Н., Гительсон А.А., Погосян С.И. Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе // Физиология растений. М.: Наука. – 1997. – Т. 44. – № 5. – С. 707-716
47. Мильков Ф.Н. Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та. – 1986. – 326 с.
48. Мильков Ф.Н., Гвоздецкий Н.А. Физическая география СССР. Общий обзор. Европейская часть СССР. Кавказ. Изд. 4-е. испр. и доп. Учебник для студентов геогр. фак. ун-тов. М.: Мысль. – 1976. – 448 с.
49. Миняев Н.А., Конечная Г. Ю. Флора Центрально-Лесного государственного' заповедника. - Л.: Наука. – 1976. – 104 с.
50. Москвитин А. И. Стратиграфия плейстоцена Европейской части СССР. М.. Наука. – 1967.
51. Мячкова Н.А. Климат СССР. – М: Изд-во МГУ. – 1983. – 191 с.
52. Невский В. Н. О рангах форм рельефа //Геоморфология. – 2009. – №. 1. – С. 3-11
53. Огуреева Г.Н. и др. Зоны и типы поясности растительности России. – М: «Экор». – 1999. – 16 стр.
54. Ольчев А. и др. (ред.). Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата. – 2017. – 274 с.

55. Отчет о полевой равнинной учебной ландшафтной практике II курса. – МГУ, кафедра физической географии и ландшафтоведения. – 2012
56. Отчет по гранту РФФИ 19-05-00539 Ландшафтные инварианты как параметры динамической системы за 2020 год URL: <https://kias.rfbr.ru> (дата обращения 10.03.2024).
57. Петрищев В. П. и др. Особенности формирования ландшафтов Индерского солянокупольного района (Прикаспийская впадина) // География и природные ресурсы. – 2011. – №. 2. – С. 79-84
58. Петрушина М. Н. Структура и особенности функционирования ландшафтов заповедника "Утриш" // Наземные и морские экосистемы Причерноморья и их охрана. – 2018. – С. 118-119.
59. Последний европейский ледниковый покров. Под ред. И.П. Герасимова. М.: Наука. – 1965
60. Почвенно-геологические условия Нечерноземья // М.: Изд-во Моск. Ун-та. – 1984. – 608 с.
61. Преображенский В. С. (ред.). Охрана ландшафтов: толковый словарь. – Прогресс. – 1982. – 272 с.
62. Преображенский В. С., Александрова Т. Д. Первичный анализ терминов динамики ландшафтов // Изв. ВГО. – 1975. – Т. 107. – №. 5. – С. 397-404
63. Пузаченко М.Ю. Методы среднемасштабного ландшафтного картографирования на основе анализа топографической карты и дистанционной информации: Дипломная работа: Архив кафедры физической географии и ландшафтоведения географического ф-та МГУ. – 2002. – 81 с.
64. Пузаченко М.Ю., Байбар А.С., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н. Ландшафтные инварианты на основе данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа // Материалы XIV Международной ландшафтной конференции Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии VII Мильковские чтения. — Воронеж: Изд-во ВГУ, 2023. — С. 55–58.
65. Пузаченко Ю. Г. Вековые изменения климата в районе заповедника // Тр. Центрально-Лесного гос. природного биосферного заповедника / под ред. А. С. Желтухина. Великие Луки: ООО «Великолукская городская типография». – 2012. – Вып. 6. – С. 6 – 32
66. Пузаченко Ю. Г. и др. Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // Лесоведение. – 2014. – №. 5. – С. 13-29.
67. Пузаченко Ю. Г. Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2010. – №. 5. – С. 6-16
68. Пузаченко Ю. Г., Скулкин В. П. Независимость внутри целого и в биотической части геосистемы // Системный подход в географии. Тезисы докладов. М. – 1972. – 275 с.
69. Пузаченко Ю.Г. Инвариантность геосистем и их компонентов // Устойчивость геосистем. М.: Наука. – 1983. – С. 32-41

70. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия. – 2004. – 408 с.
71. Пузаченко Ю.Г. Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафта // Изв. РАН Сер. геогр. – 1997. – №2
72. Пузаченко Ю.Г. Пространственно-временная иерархия геосистем с позиции теории колебаний // Вопросы географии. М.: Наука. – 1986. – С. 96-111
73. Пузаченко Ю.Г. Формирование структуры ландшафта и методы ее изучения // Вестн. МГУ. Сер. 5. Геогр. – 1999. – №1. – С. 5-12
74. Пузаченко Ю.Г., Байбар А.С., Варлагин А.В., Кренке А.Н., Сандлерский Р.Б. Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины. Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – №2. – С. 51-68 <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019251-68>
75. Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н. Геоморфологическая история развития территории Центрально-лесного заповедника // Труды Центрально-Лесного заповедника. Вып. 4. Тула: Гриф и К. – 2007. – С. 125-159
76. Пузаченко Ю.Г., Онуфрения И.А., Алещенко Г.М. Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН Сер. геогр. – 2002. – № 4. – С. 29-38
77. Пузаченко Ю.Г., Пузаченко М. Ю., Онуфрения И.В., Алещенко Г.М. Разработка генеральных схем размещения охраняемых территорий на основе дистанционной информации на примере Якутии (республика Саха) // География и природные ресурсы. – 2004. – №1. – С.10-24.
78. Пузаченко, Ю. Г., И. П. Котлов, Р. Б. Сандлерский. Анализ изменений ландшафтного покрова по данным мультиспектральной дистанционной информации в Центрально-Лесном заповеднике." Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – №3. – С. 5-18
79. Райс Р.Дж. Основы геоморфологии. // Под ред. И.П. Герасимова. М.: Прогресс. – 1980. – 574 с.
80. Рельеф и стратиграфия четвертичных отложений северо-запада Русской равнины // Под.ред. К.К. Маркова. М.: Изд-во АН СССР. – 1961
81. Рюмин А. К. К теории построения легенд геоморфологических карт среднего и мелкого масштабов //Вестн. ЛГУ. – 1958. – №. 6. – С. 101-118.
82. Сандлерский Р. Б. Выявление инварианта энергетического поля ландшафта на основе дистанционной спектрозональной информации [электронный ресурс] 25.03.2019. URL http://www.landscape.edu.ru/files/sand_lomonos_2007.pdf
83. Сандлерский Р. Б. Многомерный анализ термодинамических переменных южно-таежных биогеоценозов по данным дистанционного зондирования //Известия Самарского научного

- центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №. 15. – С. 1363 – 1366
84. Сандлерский Р. Б. Применение дистанционной информации для исследования энергетики биогеоценозов //Актуальные проблемы экологии и эволюции в исследованиях молодых ученых. – 2008. – С. 344.
 85. Сандлерский Р. Б. Термодинамические характеристики южно-таежных биогеоценозов на основе дистанционной информации (юг Валдайской возвышенности, Центрально-лесной заповедник): Дисс. канд. биол. наук.: 03.02.08. М.: ИПЭЭ РАН. – 2013. – 269 с.
 86. Сандлерский Р. Б., Пузаченко Ю. Г. Энергетические характеристики геосистем Центрально-лесного заповедника по данным дистанционного зондирования //Труды Центрально-Лесного государственного природного биосферного зап. – 2007. – №. 5. – С. 429-440
 87. Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журн. общ. биолог. – 2009. – Т. 70. – № 2. – С. 121-142
 88. Семенова-Тян-Шанская А.М., Сочава В.Б. Хвойно-широколиственные леса. В кн.: Растительный покров СССР. М. – 1956.
 89. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. Москва-Смоленск: из-во Смоленского Гуманитарного Ун-та. – 1998. – 271 с.
 90. Скулкин В.С Формирование структуры лесной растительности в гидротермическом пространстве// Экология. – 1979. – №6
 91. Соколов Н.Н. Рельеф и четвертичных отложений Центрального лесного заповедника // Ученые записки ЛГУ. Сер. географ. Л.: Наука. – 1949. – № 124. – Вып. 6. – С. 12-27
 92. Сороченков Ф.В. Геологическое строение территории Центрального лесного заповедника // Труды Центрально-лесного заповедника. Смоленск: Изд-во ЗОКНИИ. – 1937. – Вып. 2. – С. 13-21.
 93. Сочава В. Б. Вопросы классификации растительности, типологии физико-географических фаций и биогеоценозов // Вопросы классификации растительности. Свердловск: Уральский филиал АН СССР. – 1961. – С. 5-22
 94. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука. – 1978. – 319 с.
 95. Строганова М. Н., Урусевская И. С., Шоба С. А, Щипихина Л. С. Морфогенетические свойства почв Центрально-лесного государственного заповедника, их диагностика и систематика // Генезис и экология почв Центрально-лесного государственного заповедника, М.: Наука. – 1979. – С. 18-53
 96. Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги / В.Г. Карпов. – Л.: Изд-во «Наука». – 1973. – 311 с.

97. Сысуев В.В. Моделирование геофизической дифференциации геосистем // География, общество, окружающая среда. Том. II. Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Изд. дом Городец. – 2004. – С. 48-70
98. Сысуев В.В. Моделирование процессов в ландшафтно-геохимических системах. М.: Наука. – 1986
99. Сысуев В.В. Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Изв. РАН. Сер. географ. – 2003. – 34. – С. 36-50
100. Сысуев В.В., Шарый П.А. Выделение типов условий местопроизрастания для лесоустройства по участковому методу//Лесоведение. – 2000. – №5. – С. 11-21.
101. Терехин Э. А. Применение данных спутниковой съемки для анализа многолетних изменений в лесах Белгородской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №. 2. – 70 с.
102. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы // Учебное пособие для вузов. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2000. – 213 с.
103. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: КомКнига. – 2005. – 248 с.
104. Хакен Г. Принципы работы голоногого мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности// М: Изд. Пер СЕ. – 2001. – 351 с.
105. Хакен Г. Синергетика// М: Изд. МИР. – 1980. – 405 с.
106. Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: наука о взаимодействии. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2003. – 320 с.
107. Хорошев А. В., Немчинова А.В., Кошечева А.С., Иванова Н.В., Петухов И.Н., Терентьева Е.В. Ландшафтные и сукцессионные факторы соотношения неморальных и бореальных свойств травяного яруса в заповеднике Кологривский лес // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2013. – №5. – С. 11-18.
108. Хорошев А.В. Ландшафтные условия стабильности фитопродукционного функционирования в Айтуарской степи (Южный Урал) //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2021. – №. 2. – С. 82-91.
109. Хорошев А.В., Ашихмин А.П. Пространственно-временные масштабы целостного функционирования степных геосистем //Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения. – 2023. – С. 85-89.
110. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник //Популярный очерк. М.: «Издательство «Деловой мир». – 2007. – 80 с.

111. Чабан Л. Н. Методы и алгоритмы распознавания образов в автоматизированном дешифрировании данных дистанционного зондирования // М.: МИИГАиК. – 2016. – 94 с.
112. Чеботарева Н.С, Макарычева И.А. Последнее оледенение Европы и его геохронология. М.: Наука. – 1974
113. Чеботарева Н.С. Ледниковые потоки валдайского ледникового покрова // В сб. Краевые образования материковых оледенений. М.: Наука. – 1973. – 309 с.
114. Чеботарева Н.С., Саммет Э.Ю., Знаменская О.М., Рухина Е.В. Стратиграфия плейстоцена // Рельеф и стратиграфия четвертичных отложений северо-запада Русской равнины. М.: Изд-во АН СССР. – 1961
115. Чеботарёва Н.С., Фаустова М.А. Московский ледниковый покров Восточной Европы. М.: Наука. – 1982. – 240 с.
116. Черненко Т. В., Морозова О. В. Классификация и картографирование ценотического разнообразия лесов // Лесоведение. – 2017. – № 4. – С. 243–255.
117. Черных Д. В. О границах ландшафта: неортодоксальный взгляд физико-географа // Международный журнал исследований культуры. – 2015. – №. 4(21) . – С. 63 – 72
118. Чинаев П. И. (ред.). Самонастраивающиеся системы: справочник // Научная думка. – 1969. – 528 с.
119. Шарая Л.С., Шарый П.А. Использование морфометрических статистик для описания внутренней геометрии равнинных и горных местностей // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2003. – Т. 5. – №2. – С. 278-286
120. Шенников А.П. Васильев Я.Я. Евразийская хвойно-лесная таежная область. В кн. Геоботаническое районирование СССР М. - 1947
121. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2001. – 528 с.
122. Шуйская Е.А. Климатические изменения в Центрально-лесном биосферном заповеднике (Тверская область) / Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов. Мат. Всерос. научно-практической конф. 22–24 апреля 2021 г. Екатеринбург. – 2021. – С. 185–192.
123. Abdullah N. A. et al. Face recognition for criminal identification: An implementation of principal component analysis for face recognition // AIP conference proceedings. – AIP Publishing, 2017. – Vol. 1891. – No. 1.
124. Abeywardena V. An application of principal component analysis in genetics // Journal of genetics. – 1972. – Vol. 61. – 27-51 p.
125. Abotteen R. A. Analysis of principal component transformed LANDSAT data. – 1976. – No. LEC-9003.
126. Abson D. J., Dougill A. J., Stringer L. C. Using principal component analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in

- Southern Africa //Applied Geography. – 2012. – Vol. 35. – No. 1-2. – 515-524 p.
127. Abuelgasim A., Ammad R. Mapping Sabkha Land surfaces in the United Arab Emirates (UAE) using Landsat 8 data, principal component analysis and soil salinity information //Int J Eng Manuf. – 2017. – Vol. 7. – No. 4. – 1-11 p.
 128. Allen T.F.H., Starr T.B. Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Chicago: The University of Chicago Press. –1982. –310 p.
 129. Amri R. et al. Analysis of vegetation behavior in a North African semi-arid region, using SPOT-VEGETATION NDVI data //Remote sensing. – 2011. – Vol. 3. – No. 12. – 2568-2590 p.
 130. Antico A. Independent component analysis of MODIS-NDVI data in a large South American wetland //Remote sensing letters. – 2012. – Vol. 3. – No. 5. – 383-392 p.
 131. Avena G. C., Ricotta C., Volpe F. The influence of principal component analysis on the spatial structure of a multispectral dataset //International Journal of Remote Sensing. – 1999. – Vol. 20. – No. 17. – 3367-3376 p.
 132. Bahurupi S. P., Chaudhari D. S. Principal component analysis for face recognition //International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2012. – Vol. 1. – No. 5. – 91-94 p.
 133. Baig M. H. A. et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance //Remote Sensing Letters. – 2014. – Vol. 5. – No. 5. – P. 423-431.
 134. Baker Victor R. Introduction: Regional Landforms Analysis. Ed. Nicholas M. Short, Sr. and Robert W. Blair, Jr. Geomorphology from Space NASA. –1986. <http://geoinfo.amu.edu.pl/wpk/geos/>.
 135. Bakshi N., Prabhu V. Face recognition system for access control using principal component analysis //2017 International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT). – IEEE, 2017. –145-150 p.
 136. Balázs B. et al. Extracting water-related features using reflectance data and principal component analysis of Landsat images //Hydrological sciences journal. – 2018. – Vol. 63. – No. 2. – 269-284 p.
 137. Bellón B. et al. A remote sensing approach for regional-scale mapping of agricultural land-use systems based on NDVI time series //Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9. – No 6. – 600 p.
 138. Bila J., Jura J. Fuzzy concepts in the detection of unexpected situations //Acta Polytechnica. – 2007. – Vol. 47. – No. 1.
 139. Bila J., Jura J. Unexpected versus ill separable situations //Proc. of 4th IMECO International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions–ISHF. – 2010. – 96-101 p.
 140. Bíla J., Jura J., Bukovsky I. Qualitative modeling and monitoring of the selected ecosystem violated with parasitic dehumidifying and dehydrating //WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and

- Computers in Science and Engineering. – World Scientific and Engineering Academy and Society. – 2009. – No. 10.
141. Bila J., Jura J., Bukovsky I. Qualitative modeling in the landscape development monitoring //landscape. – 2011. – Vol. 27. – No. 29. – 26-35 p.
 142. Byrne G. F., Crapper P. F., Mayo K. K. Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data //Remote sensing of Environment. – 1980. – Vol. 10. – No. 3. – 175-184 p.
 143. Campbell M. J., Congalton R. G. Landsat-based land cover change analysis in Northeastern Oregon's timber resource dependent communities //American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 2012 Annual Conference. –2012. –19-23 p.
 144. Cao W., Li B., Zhang Y. A remote sensing image fusion method based on PCA transform and wavelet packet transform. In International Conference on Neural Networks and Signal Processing. –2003. –Vol. 2. –976-981 p.
 145. Cartone A., Postiglione P. Principal component analysis for geographical data: the role of spatial effects in the definition of composite indicators //Spatial Economic Analysis. – 2021. – Vol. 16. – No. 2. – 126-147 p.
 146. Chan L. H., Salleh S. H., Ting C. M. Face biometrics based on principal component analysis and linear discriminant analysis //Journal of Computer Science. – 2010. – Vol. 6. – No. 7. – 693 p.
 147. Chang H., and Yoon W. S. Improving the classification of Landsat data using standardized principal components analysis. KSCE Journal of Civil Engineering. –2003. –Vol.7. – No. 4. – 469–474 p.
 148. Choi M. A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. –2006. – No.44. –1672–1682 p.
 149. Conese C. et al. Forest classification by principal component analyses of TM data //International Journal of Remote Sensing. – 1988. – Vol. 9. – No. 10-11. –1597-1612 p.
 150. Dasu V., Reddy V. N., Reddy C. M. Classification of Landsat-8 Imagery Based on Pca And Ndvi Methods //International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2019. – Vol. 8. – No. 10. – 4321 p.
 151. Davis, J. C. Statistics and Data Analysis in Geology, 3rd ed. New York: Wiley. – 2002
 152. de Almeida T. I. R. et al. Principal component analysis applied to a time series of MODIS images: the spatio-temporal variability of the Pantanal wetland, Brazil //Wetlands ecology and management. – 2015. – Vol. 23. – 737-748 p.
 153. Demšar U. et al. Principal component analysis on spatial data: an overview //Annals of the Association of American Geographers. – 2013. – Vol. 103. – No. 1. –106-128 p.
 154. Dharani M., Sreenivasulu G. Land use and land cover change detection by using principal component analysis and morphological operations in

- remote sensing applications //International Journal of Computers and Applications. – 2021. – Vol. 43. – No. 5. –462-471 p.
155. Dikau R. The application of a digital relief model to landform analysis. // Three-dimensional applications of Geographical Information Systems.Raper J.(ed.) London, UK: Taylor & Francis. – 1989. – P. 77–90.
 156. Dormann C. F. et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance //Ecography. – 2013. – Vol. 36. – No. 1. –27-46 p.
 157. Dragović S., Onjia A. Classification of soil samples according to their geographic origin using gamma-ray spectrometry and principal component analysis //Journal of environmental radioactivity. – 2006. – Vol 89. – No. 2. –150-158 p.
 158. Dufrêne M., Legendre P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach // Ecological Monographs. – 1997. – P. 345–366.
 159. Eastman J. R., Fulk M. Long sequence time series evaluation using standardized principal components //Photogrammetric Engineering and remote sensing. – 1993. – Vol. 59. – No. 6.
 160. Estornell J. et al. Principal component analysis applied to remote sensing //Modelling in Science Education and Learning. – 2013. – Vol. 6. –83-89 p.
 161. Federolf P. et al. The application of principal component analysis to quantify technique in sports //Scandinavian journal of medicine & science in sports. – 2014. – Vol. 24. – No. 3. –491-499 p.
 162. Ferreira L. G., Huete A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices //International Journal of Remote Sensing. – 2004. – Vol. 25. – No. 10. – 1837-1860 p.
 163. Filzmoser P., R. Maronna, M. Werner. “Outlier Identification in High Dimensions.” Computational Statistics and Data Analysis. – 2008. – No. 52. – 1694–1711 p.
 164. Fontanel A., Blanchet C., Lallemand C. Enhancement of Landsat imagery by combination of multispectral classification and principal component analysis //Proceedings of the NASA Earth Resources Survey Symposium, IB. – 1975. – 991-1012 p.
 165. Forman R.T. Land mosaics: The ecology of landscapes and regions 1995. The Ecological Design and Planning Reader; IslandPress: Washington, DC, USA. – 2014. – 217-234 p.
 166. Fung T., LeDrew E. Application of principal components analysis change detection. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1987. – Vol. 53. – 1649-1658 p.
 167. Fung T., Siu W. Environmental quality and its changes, an analysis using NDVI //International Journal of Remote Sensing. – 2000. – Vol. 21. – No. 5. –1011-1024 p.

168. Gobattoni F., Lauro G., Monaco R., Pelorosso R. Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests. *Acta Applicandae Mathematicae*. –2013. –Vol. 125. – No.1. –173-192 p.
169. Godron, R.F.M. *Landscape Ecology* Wiley New York. New York, USA. – 1986. – 620 p.
170. Graham M. H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression // *Ecology*. – 2003. – Vol. 84. – No. 11. –2809-2815 p.
171. Greenacre M. et al. Principal component analysis // *Nature Reviews Methods Primers*. – 2022. – Vol. 2. – No. 1. – 100 p.
172. Griffith D., C. Amrhein. *Multivariate Statistical Analysis for Geographers*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. –1997
173. Griffiths P., van der Linden S., Kuemmerle T., Hostert P. A pixel-based Landsat compositing algorithm for large area land cover mapping // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. –2013. –Vol.6. – No.5. – 2088-2101 p.
174. Ha T. et al. Transformation of small-scale meteorological tsunami due to terrain complexity on the western coast of Korea // *Journal of Coastal Research*. – 2014. – No. 70. –284-289 p.
175. Hall-Beyer M. Comparison of single-year and multiyear NDVI time series principal components in cold temperate biomes // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 41. – No. 11. –2568-2574 p.
176. Harris P., Clarke A., Juggins S., Brunsdon C., Charlton M. Enhancements to a geographically weighted principal component analysis in the context of an application to an environmental data set. *Geographical analysis*. – 2015. – Vol. 47. – No.2. – 146-172 p.
177. Henson R. K., Roberts J. K. Use of exploratory factor analysis in published research: Common errors and some comment on improved practice // *Educational and Psychological measurement*. – 2006. – Vol. 66. – No. 3. –393-416 p.
178. Hirosawa Y., Marsh S. E., Kliman D. H. Application of standardized principal component analysis to land-cover characterization using multitemporal AVHRR data // *Remote Sensing of Environment*. – 1996. – Vol. 58. – No. 3. –267-281 p.
179. Huang F. et al. Regional terrain complexity assessment based on principal component analysis and geographic information system: a case of Jiangxi province, China // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9. – No. 9. –539 p.
180. Hubert M., P. J. Rousseeuw, K. Vanden Branden. ROBPCA: A New Approach to Robust Principal Component Analysis. // *Technometrics*. – 2005. –Vol. 47. – 64–79 p.
181. Indriasari N. et al. Spatial-temporal dynamics of paddy productivity on the north coast of Java Island, Indonesia based on the principal component analysis of MODIS NDVI anomaly data // *IOP Conference Series: Earth*

- and Environmental Science. – IOP Publishing, 2024. – Vol. 1291. – No. 1. – 012016 p.
182. Ingebritsen S. E., and LYON R. J. P. Principal components analysis of multitemporal image pairs. *International Journal of Remote Sensing*. – 1985. – Vol.6. – No.5. – 687–696 p.
 183. Javed A. Face recognition based on principal component analysis // *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*. – 2013. – Vol. 5. – No. 2. – 38 p.
 184. Jiaju L. Development of principal component analysis applied to multitemporal Landsat TM data // *International Journal of Remote Sensing*. – 1988. – Vol. 9. – No. 12. – 1895-1907 p.
 185. Johnston, R. J. *Multivariate Statistical Analysis in Geography*. London: Longman. – 1978
 186. Kaiser H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis // *Psychometrika*. – 1958. – Vol. 23. – No. 3. – 187-200 p.
 187. Kaspari M., S. Yanoviak Biogeochemistry and the Structure of Tropical Brown Food Webs // *Ecology*. – 2009. – Vol. 90. – 3342–3351 p.
 188. Kauth R. J., Thomas G. S. The tasselled cap--a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat // *LARS symposia*. – 1976. – 159 p.
 189. Koutsias N., Mallinis G., Karteris M. A forward/backward principal component analysis of Landsat-7 ETM+ data to enhance the spectral signal of burnt surfaces // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 64. – No. 1. – 37-46 p.
 190. Kwarteng P., Chavez A. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* – 1989. – Vol. 55. – 339-348 p.
 191. Lanorte A. et al. On the use of the Principal Component Analysis (PCA) for evaluating vegetation anomalies from LANDSAT-TM NDVI Temporal Series in the Basilicata Region (Italy) // *Computational Science and Its Applications--ICCSA 2015: 15th International Conference, Banff, AB, Canada, June 22-25. – 2015, Proceedings, Part IV 15. – Springer International Publishing, 2015. – 204-216 p.*
 192. Lasaponara R. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series // *Ecological modelling*. – 2006. – Vol. 194. – No. 4. – 429-434 p.
 193. Lecours V. et al. Towards a framework for terrain attribute selection in environmental studies // *Environmental modelling & software*. – 2017. – Vol. 89. – 19-30 p.
 194. Legendre P., E. Gallagher. Ecological Meaningful Transformations for Ordination of Species Data // *Oecologia*. – 2001. – Vol. 129. – 271–280 p.
 195. Legendre P., L. Legendre. *Numerical Ecology*, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. – 1998.

196. Levi M. R., Rasmussen C. Covariate selection with iterative principal component analysis for predicting physical soil properties //Geoderma. – 2014. – T. 219. – 46-57 p.
197. Li X., Yeh A. G. O. Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta //International Journal of Remote Sensing. – 1998. – Vol. 19. – No. 8. –1501-1518 p.
198. Libório M. P. et al. Representing Multidimensional Phenomena of Geographic Interest: Benefit of the Doubt or Principal Component Analysis? //The Professional Geographer. – 2022. – Vol. 74. – No. 4. – 758-771 p.
199. Liu J. et al. The effects of terrain factors on the drainage area threshold: comparison of principal component analysis and correlation analysis //Environmental Monitoring and Assessment. – 2022. – Vol. 194. – No. 3. –168 p.
200. Longshaw T. G. Computerized Multivariate Analysis of Landsat Satellite Imagery for Geology in South Africa //IFAC Proceedings Volumes. – 1976. – Vol. 9. – No. 5. –289-298 p.
201. Lulla K. et al. Mission to earth: LANDSAT 9 will continue to view the world //Geocarto International. – 2021. – Vol. 36. – No. 20. –2261-2263 p.
202. Luo Y., Trishchenko A.P., Khlopenkov K.V. Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112. – No.12. – 4167-4185 p.
203. Mandelbrot B. Fractals: Form, Chance and Dimension. San Francisco, CA: W. H. Freeman and Company. – 1977. –265 p.
204. Mandelbrot B. Les objets fractals: form, hazard et dimension. Paris: Flammarion, 1975. –192 p.
205. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. New York.: W. H. Freeman and Company. –1982. – 461 p.
206. Markham, B.L., Jenstrom, D., Masek, J.G., Dabney, P., Pedelty, J.A., Barsi, J.A. and Montanaro, M. Landsat 9: Status and plans. In Earth Observing Systems XXI. – 2016. – Vol. 9972. – 127-132 p.
207. Masek J. G. et al. Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity //Remote Sensing of Environment. – 2020. – Vol. 248. – 111968 p.
208. Mather P. M. Computational Methods of Multivariate Analysis in Physical Geography. London: Wiley. – 1976
209. Maynard J. J., Johnson M. G. Uncoupling the complexity of forest soil variation: Influence of terrain indices, spectral indices, and spatial variability //Forest Ecology and Management. – 2016. – Vol. 369. – 89-101 p.

210. Mbereggo S., Sanga-Ngoie K., Kobayashi S. Vegetation dynamics of Zimbabwe investigated using NOAA-AVHRR NDVI from 1982 to 2006: a principal component analysis //International journal of remote sensing. – 2013. – Vol. 34. – No. 19. –6764-6779 p.
211. Meijerink A. M. J. Digital pre-processing techniques of Landsat data in high relief area—a Himalayan example //Journal of the Indian Society of Photo-Interpretation. – 1976. – Vol. 4. –15-19 p.
212. Meshram S. G., Sharma S. K. Application of principal component analysis for grouping of morphometric parameters and prioritization of watershed //Hydrologic Modeling: Select Proceedings of ICWEES-2016. – Springer Singapore. – 2018. –447-458 p.
213. Metwalli M.R., Nasr A.H., Allah O.S.F., El-Rabaie S., Abd El-Samie F.E. Satellite image fusion based on principal component analysis and high-pass filtering. J. Opt. Soc. Am. A. – 2010. – Vol. 27. – 1385–1394 p.
214. Mishra N., Satyanarayana T. Parameter grouping—a prelude to hydrologic modeling //Indian J Power River Val Dev. – 1988. – Vol. 256260.
215. Misra P. N., Wheeler S. G. Crop classification with LANDSAT multispectral scanner data //Pattern Recognition. – 1978. – Vol. 10. – No. 1. –1-13 p.
216. Montanaro et al. Landsat 9 Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2) Stray Light Mitigation and Assessment,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2022. – Vol. 60. – 1-8 p., doi: 10.1109/TGRS.2022.3177312.
217. Munyati C. Use of principal component analysis (PCA) of remote sensing images in wetland change detection on the Kafue Flats, Zambia //Geocarto International. – 2004. – Vol. 19. – No. 3. –11-22 p.
218. Naidu V.P.S., Raol J.R. Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis. Def. Sci. J. – 2008. – Vol. 58. – 338–352 p.
219. Nandi A. et al. Flood hazard mapping in Jamaica using principal component analysis and logistic regression //Environmental Earth Sciences. – 2016. – Vol. 75. –1-16 p.
220. Nguyen B. T., Nguyen T. M. T., Bach Q. V. Assessment of groundwater quality based on principal component analysis and pollution source-based examination: a case study in Ho Chi Minh City, Vietnam //Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192. –1-13 p.
221. Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V., Arbiol R. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1999. – Vol. 37. – 1204–1211 p.
222. Officer S. J. et al. Relationships between soil bulk electrical conductivity and the principal component analysis of topography and soil fertility values //Plant and Soil. – 2004. – Vol. 258. – 269-280 p.
223. O'Neill R.V., Deangelis D.L., Waide J.B., Allen T.F. Allen G.E. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton University Press. –1986. – No. 23. – 254 p.

224. O'Neill R.V., Milne B.T., Turner M.G., Gardner R.H. Resource utilization scales and landscape pattern. *Landscape Ecology*. – 1988. – Vol.2. – No.1. – 63-69 p.
225. Parmentier B. Characterization of land transitions patterns from multivariate time series using seasonal trend analysis and principal component analysis // *Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 6. – No. 12. – 12639-12665 p.
226. Patterson M. W., Yool S. R. Mapping fire-induced vegetation mortality using Landsat Thematic Mapper data: A comparison of linear transformation techniques // *Remote Sensing of Environment*. – 1998. – Vol. 65. – No. 2. – P. 132-142.
227. Pearson K., On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *Philosophical Magazine*. – 1901. – No.2. – 559-572 p.
228. Pesaresi S. et al. Mapping mediterranean forest plant associations and habitats with functional principal component analysis using Landsat 8 NDVI time series // *Remote sensing*. – 2020. – Vol. 12. – No. 7. – 1132 p.
229. Pittman S. J., Costa B. M., Battista T. A. Using lidar bathymetry and boosted regression trees to predict the diversity and abundance of fish and corals // *Journal of Coastal Research*. – 2009. – No. 10053. – 27-38 p.
230. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – Vol. 115. – No. 2. – 548-561 p.
231. Rawat J. S., Joshi R. C. Remote-sensing and GIS-based landslide-susceptibility zonation using the landslide index method in Igo River Basin, Eastern Himalaya, India // *International journal of remote sensing*. – 2012. – Vol. 33. – No. 12. – 3751-3767 p.
232. Reich D., Price A. L., Patterson N. Principal component analysis of genetic data // *Nature genetics*. – 2008. – Vol. 40. – No. 5. – 491-492 p.
233. Riasati V.R.; Zhou H. Reduced data projection slice image fusion using principal component analysis. *Proc. SPIE*. – 2005. – Vol. 5813. – 1–15 p.
234. Rifman S. S. et al. Experimental study of digital image processing techniques for LANDSAT data. – 1976. – No. NASA-CR-152552.
235. Rooper C. N., Zimmermann M. A bottom-up methodology for integrating underwater video and acoustic mapping for seafloor substrate classification // *Continental Shelf Research*. – 2007. – Vol. 27. – No. 7. – 947-957 p.
236. Roy D.P., Ju J., Kline K., Scaramuzza P.L., Kovalsky V., Hansen M., Loveland T.R., Vermote E., Zhang C. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States // *Remote Sensing of Environment*. – 2010. – Vol. 114. – No.1. – 35-49 p.
237. Rummel R. J. *Applied factor analysis*. – Northwestern University Press. – 1988

238. Sandlersky R., Krenke A. Solar energy transformation strategies by ecosystems of the boreal zone (thermodynamic analysis based on remote sensing data) // *Entropy*. – 2020. – Vol. 22. – No. 10. –1132 p.
239. Shahdoosti H. R., Ghassemian, H. Spatial PCA as a new method for image fusion. The 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP 2012). – 2012. – 90-94 p.
240. Sharaf El Din E. Enhancing the accuracy of retrieving quantities of turbidity and total suspended solids using Landsat-8-based-principal component analysis technique // *Journal of Spatial science*. – 2021. – Vol. 66. – No. 3. –493-512 p.
241. Sharma S. K., Gajbhiye S., Prasad T. Identification of influential geomorphological parameters for hydrologic modeling // *Sci-fronts, A Journal of Multiple Science*. – 2009. – Vol. 3. –9-16 p.
242. Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global (Digital Object Identifier (DOI) number: /10.5066/F7PR7TFT
243. Singh P. K. et al. Application of principal component analysis in grouping geomorphic parameters for hydrologic modeling // *Water Resources Management*. – 2009. – Vol. 23. – No. 2. –325-339 p.
244. Sun D. et al. Spatializing regional fertilizer input based on MODIS NDVI time series // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. – 2010. – Vol. 26. – No. 6. –175-180 p.
245. Tabachnick B. G., Fidell L. S., Ullman J. B. Using multivariate statistics. – Boston, MA: pearson. – 2013. – Vol. 6. – 497-516 p.
246. Tang Y. et al. Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping: A comparative study from the loess plateau area in Shanxi (China) // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 277. – 124159 p.
247. Tiwari R. N., Kushwaha V. K. Watershed prioritization based on morphometric parameters and PCA technique: a case study of deonar river sub basin, sidhi area, Madhya Pradesh, India // *Journal of the Geological Society of India*. – 2021. – Vol. 97. – 396-404 p.
248. Townshend J. R. G., Goff T. E., Tucker C. J. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*. – 1985. – No. 6. – 888-895 p.
249. Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P. S. A new look at IHS-like image fusion methods // *Information Fusion*. – 2001. – Vol. 2. – No.3. – 177–186 p.
250. Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. Efficient intensity-hue-saturation-based image fusion with saturation compensation // *Opt. Eng.* – 2001. – No. 40. – 720–728 p.
251. Turcotte Donald L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics* // Second edition. Cambridge Un. Press. – 1997. –398 p.

252. Turner M.G. Landscape ecology: the effect of pattern on process // Annual review of ecology and systematics. – 1989. – Vol. 20. – No.1. – 171-197 p.
253. Turner M.G. Landscape ecology: what is the state of the science? // Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. –2005. – No.36. – 319-344 p.
254. Turner M.G., Gardner R.H., O'Neill R.V. Landscape ecology in theory and practice. Springer New York. – 2001. – Vol. 401. – 499 p.
255. Uddin M. N. et al. Mapping of climate vulnerability of the coastal region of Bangladesh using principal component analysis //Applied geography. – 2019. – Vol. 102. – 47-57 p.
256. Wang T. et al. Temporal and spatial patterns of NDVI and their relationship to precipitation in the Loess Plateau of China //International Journal of Remote Sensing. – 2010. – Vol. 31. – No. 7. –1943-1958 p.
257. Williams D. L., Borden F. Y. A reduction in ag/residential signature conflict using principal components analysis of LANDSAT temporal data. – 1977. – No. X-923-77-182
258. Williams D. L., Goward S., Arvidson T. Landsat //Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2006. – Vol. 72. – No. 10. –1171-1178 p.
259. Wu J. and Qi P.Y. Dealing with scale in landscape analysis: an overview. Geographic Information Sciences. – 2000. – Vol. 6. – No.1. – 1–5 p.
260. Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations // Landscape ecology. – 2004. – Vol. 19. – No.2. – 125-138 pp.
261. Wu J.G. Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In Wu J.G., Hobbs R., (Eds): Key topics in landscape ecology. Cambridge University Press, Cambridge. – 2006. – 115 – 142 p.
262. Wulder M. A. et al. Current status of Landsat program, science, and applications //Remote sensing of environment. – 2019. – Vol. 225. – 127-147 p.
263. Wulder M. A. et al. Fifty years of Landsat science and impacts //Remote Sensing of Environment. – 2022. – Vol. 280. –113195 p.
264. Yonghong J. Fusion of Landsat TM and SAR images based on principal component analysis //Remote Sensing Technology and Application. – 2012. – Vol. 13. – No. 1. – 46-49 p.
265. Zhang Q. et al. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques in red soil hilly region: a case study of Xiangjiang watershed, China //Environmental monitoring and assessment. – 2009. – Vol. 152. – 123-131 p.
266. Zhu Z., Woodcock C.E., Holden C., Yang Z. Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance at any given time // Remote Sensing of Environment. – 2015. – No. 162. – 67-83 p.

Приложение

Приложение 1 Среднее значения характеристик рельефа, приходящиеся на класс

№ класса	Микрорельеф					Мезорельеф								
	Абсолютная высота	Крутизна	Освещенность с Ю	Минимальная кривизна	Максимальная кривизна	Освещенность с В (R35)	Минимальная кривизна (R43)	Максимальная кривизна (R43)	Крутизна (R55)	Крутизна (R81)	Освещенность с Ю (R81)	Освещенность с В (R81)	Максимальная кривизна (R81)	Минимальная кривизна (R81)
1	279	1,331	0,704	-0,0206	0,0066	0,70695	-0,014	0,0280	0,775	0,642	0,708	0,706	0,0362	-0,001
2	266	1,034	0,708	-0,0122	0,0068	0,70693	-0,013	0,0164	0,604	0,519	0,709	0,706	0,0199	-0,006
3	275	1,081	0,714	-0,0126	0,0072	0,70706	-0,005	0,0245	0,610	0,520	0,711	0,707	0,0319	0,005
4	261	0,959	0,713	-0,0084	0,0081	0,70723	-0,006	0,0178	0,517	0,450	0,711	0,707	0,0194	-0,001
5	253	0,493	0,708	-0,0042	0,0035	0,70720	-0,007	0,0110	0,325	0,289	0,708	0,707	0,0130	-0,003
6	237	0,364	0,708	-0,0025	0,0034	0,70723	-0,005	0,0074	0,216	0,191	0,708	0,708	0,0064	-0,004
7	247	0,841	0,711	-0,0080	0,0076	0,70713	-0,009	0,0121	0,400	0,349	0,709	0,707	0,0101	-0,007
8	237	0,836	0,712	-0,0051	0,0108	0,70719	-0,008	0,0101	0,283	0,246	0,709	0,707	0,0062	-0,007
9	237	0,130	0,707	-0,0006	0,0005	0,70710	-0,002	0,0030	0,111	0,101	0,707	0,707	0,0044	-0,001
10	239	0,145	0,707	-0,0007	0,0007	0,70713	-0,002	0,0035	0,114	0,105	0,707	0,707	0,0051	-0,001
11	239	0,145	0,707	-0,0006	0,0007	0,70706	-0,002	0,0036	0,110	0,099	0,707	0,707	0,0046	-0,002
12	242	0,216	0,707	-0,0018	0,0014	0,70717	-0,006	0,0046	0,170	0,158	0,707	0,708	0,0058	-0,004
13	241	0,228	0,707	-0,0013	0,0022	0,70710	-0,004	0,0044	0,146	0,135	0,707	0,707	0,0039	-0,004
14	242	0,172	0,707	-0,0010	0,0010	0,70705	-0,003	0,0045	0,136	0,121	0,707	0,707	0,0055	-0,002
15	242	0,162	0,707	-0,0008	0,0009	0,70706	-0,003	0,0036	0,124	0,114	0,707	0,707	0,0036	-0,004
16	267	1,602	0,696	-0,0206	0,0082	0,70755	-0,024	0,0141	0,914	0,751	0,703	0,707	0,0199	-0,016
17	262	1,646	0,692	-0,0145	0,0120	0,70766	-0,029	0,0092	0,896	0,761	0,701	0,708	0,0064	-0,028
18	258	0,855	0,703	-0,0088	0,0048	0,70698	-0,015	0,0097	0,508	0,437	0,706	0,706	0,0128	-0,010
19	254	1,297	0,703	-0,0156	0,0088	0,70668	-0,019	0,0138	0,629	0,529	0,707	0,705	0,0118	-0,015
20	248	1,134	0,700	-0,0126	0,0079	0,70683	-0,021	0,0080	0,533	0,456	0,705	0,705	0,0065	-0,018

21	246	1,344	0,697	-0,0124	0,0110	0,70690	-0,025	0,0073	0,505	0,428	0,705	0,706	0,0032	-0,025
22	242	0,304	0,706	-0,0022	0,0023	0,70716	-0,005	0,0062	0,212	0,192	0,707	0,707	0,0059	-0,004
23	235	0,352	0,708	-0,0020	0,0044	0,70717	-0,005	0,0060	0,170	0,148	0,707	0,707	0,0034	-0,006
24	247	0,504	0,706	-0,0045	0,0038	0,70712	-0,009	0,0077	0,304	0,273	0,707	0,707	0,0067	-0,007
25	239	0,767	0,708	-0,0068	0,0089	0,70704	-0,011	0,0081	0,289	0,254	0,708	0,707	0,0042	-0,011
26	243	0,502	0,704	-0,0037	0,0040	0,70713	-0,010	0,0056	0,291	0,265	0,706	0,706	0,0033	-0,010
27	237	0,364	0,707	-0,0019	0,0045	0,70719	-0,007	0,0054	0,188	0,168	0,707	0,707	0,0015	-0,009
28	238	0,817	0,707	-0,0060	0,0110	0,70704	-0,013	0,0080	0,276	0,240	0,707	0,707	0,0024	-0,014
29	240	0,886	0,703	-0,0057	0,0111	0,70700	-0,017	0,0073	0,310	0,270	0,707	0,707	0,0011	-0,019
30	248	1,537	0,712	-0,0199	0,0139	0,70723	-0,015	0,0169	0,555	0,464	0,710	0,706	0,0123	-0,011
31	241	1,369	0,715	-0,0087	0,0173	0,70728	-0,010	0,0158	0,402	0,335	0,709	0,707	0,0095	-0,009
32	252	2,273	0,702	-0,0470	0,0164	0,70742	-0,030	0,0171	0,875	0,733	0,709	0,704	0,0134	-0,018
33	260	2,094	0,721	-0,0289	0,0173	0,70761	-0,012	0,0230	0,819	0,671	0,712	0,706	0,0211	-0,004
34	251	2,481	0,726	-0,0202	0,0270	0,70755	-0,013	0,0220	0,729	0,583	0,711	0,707	0,0174	-0,008
35	239	1,373	0,708	-0,0128	0,0168	0,70695	-0,016	0,0130	0,398	0,329	0,708	0,707	0,0065	-0,015
36	238	1,176	0,706	-0,0062	0,0177	0,70683	-0,016	0,0131	0,347	0,279	0,707	0,707	0,0035	-0,017
37	241	2,321	0,692	-0,0268	0,0235	0,70685	-0,035	0,0151	0,623	0,495	0,706	0,706	0,0083	-0,028
38	245	1,427	0,713	-0,0079	0,0204	0,70726	-0,011	0,0165	0,426	0,350	0,709	0,707	0,0086	-0,011
39	250	2,937	0,728	-0,0146	0,0399	0,70720	-0,016	0,0249	0,701	0,541	0,710	0,706	0,0132	-0,015
40	255	1,169	0,706	-0,0036	0,0198	0,70713	-0,010	0,0166	0,334	0,259	0,707	0,707	0,0057	-0,013
41	257	2,564	0,706	-0,0077	0,0428	0,70623	-0,019	0,0261	0,525	0,393	0,707	0,706	0,0096	-0,025

Приложение 2 Качественные характеристики микрорельефа. Среднее на класс

	Абсолютная высота	Освещенность с Ю	Крути- зна	Минимальная кривизна	Максимальная кривизна
1	относительно высоко	преимущественно С экспозиции	плоско	вогнутые	плоско
2	средне	преимущественно С экспозиции	плоско	слабовогнутый	плоско
3	высоко	преимущественно Ю экспозиции	плоско	слабовогнутый	плоско
4	средне	преимущественно Ю экспозиции	плоско	плоско	плоско
5	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
6	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
7	относительно низко	преимущественно Ю экспозиции	плоско	плоско	плоско
8	относительно низко	преимущественно Ю экспозиции	плоско	плоско	слабовыпуклый
9	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
10	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
11	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
12	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
13	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
14	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
15	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
16	средне	преимущественно С экспозиции	средне плоско	вогнутые	плоско
17	средне	преимущественно С экспозиции	средне плоско	слабовогнутый	слабовыпуклый
18	средне	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	плоско
19	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	слабовогнутый	плоско
20	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	слабовогнутый	плоско
21	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	слабовогнутый	слабовыпуклый
22	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско

23	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
24	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	плоско
25	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	плоско
26	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	плоско
27	относительно низко	преимущественно С экспозиции	очень плоско	плоско	плоско
28	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	слабовыпуклый
29	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	слабовыпуклый
30	относительно низко	преимущественно Ю экспозиции	средне плоско	слабовогнутый	слабовыпуклый
31	относительно низко	преимущественно Ю экспозиции	плоско	плоско	слабовыпуклый
32	относительно низко	преимущественно С экспозиции	средне плоско	вогнутые	слабовыпуклый
33	средне	преимущественно Ю экспозиции	средне плоско	вогнутые	слабовыпуклый
34	относительно низко	преимущественно Ю экспозиции	средне плоско	вогнутые	слабовыпуклый
35	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	слабовогнутый	слабовыпуклый
36	относительно низко	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	слабовыпуклый
37	относительно низко	преимущественно С экспозиции	средне плоско	вогнутые	слабовыпуклый
38	относительно низко	преимущественно Ю экспозиции	плоско	плоско	слабовыпуклый
39	средне	преимущественно Ю экспозиции	относит ельно круто	слабовогнутый	выпуклый
40	средне	преимущественно С экспозиции	плоско	плоско	слабовыпуклый
41	средне	преимущественно С экспозиции	относит ельно круто	плоско	выпуклый

Приложение 3 Качественные характеристики мезорельефа, на основе средних значений на класс

№	Освещенность с В (R35)	Минимальная кривизна (R43)	Максимальная кривизна (R43)	Крутизна (R55)	Крутизна (R81)	Освещенность с Ю (R81)	Освещенность с В (R81)	Максимальная кривизна (R81)	Минимальная кривизна (R81)
1	преимущественно 3 экспозиции	плоско	выпуклые	с небольшим уклоном	с небольшим уклоном	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но 3 экспозиции	выпуклые	плоско
2	преимущественно 3 экспозиции	плоско	слабовыпуклые	с небольшим уклоном	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но 3 экспозиции	слабовыпуклые	плоско
3	преимущественно 3 экспозиции	плоско	выпуклые	с небольшим уклоном	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	выпуклые	плоско
4	преимущественно В экспозиции	плоско	слабовыпуклые	с небольшим уклоном	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	слабовыпуклые	плоско
5	преимущественно В экспозиции	плоско	слабовыпуклые	плоско	очень плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	слабовыпуклые	плоско
6	преимущественно В экспозиции	плоско	плоско	плоско	очень плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	плоско	плоско
7	преимущественно В экспозиции	плоско	слабовыпуклые	плоско	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	слабовыпуклые	плоско
8	преимущественно В экспозиции	плоско	слабовыпуклые	плоско	очень плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	плоско	плоско
9	преимущественно 3 экспозиции	плоско	плоско	очень плоско	очень плоско	преимуществен но С экспозиции	преимуществен но В экспозиции	плоско	плоско

34	преимущественно В экспозиции	плоско	выпуклые	с небольшим уклоном	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	слабовыпуклые	плоско
35	преимущественно З экспозиции	слабовогнутые	слабовыпуклые	плоско	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	плоско	слабовогнутые
36	преимущественно З экспозиции	слабовогнутые	слабовыпуклые	плоско	очень плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	плоско	слабовогнутые
37	преимущественно З экспозиции	вогнутые	слабовыпуклые	с небольшим уклоном	плоско	преимуществен но С экспозиции	преимуществен но З экспозиции	плоско	вогнутые
38	преимущественно В экспозиции	плоско	слабовыпуклые	плоско	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	плоско	слабовогнутые
39	преимущественно В экспозиции	слабовогнутые	выпуклые	с небольшим уклоном	плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но З экспозиции	слабовыпуклые	слабовогнутые
40	преимущественно В экспозиции	плоско	слабовыпуклые	плоско	очень плоско	преимуществен но Ю экспозиции	преимуществен но В экспозиции	плоско	слабовогнутые
41	преимущественно З экспозиции	слабовогнутые	выпуклые	с небольшим уклоном	плоско	преимуществен но С экспозиции	преимуществен но З экспозиции	плоско	вогнутые

Приложение 4 Средние значения характеристик древостоя, приходящиеся на класс

№	Высота	Сомкнутость	Сумм. СПС	СПС Сосна	СПС Ель	СПС Береза	СПС Осина	СПС Ольха сер.	СПС Ольха чер.	СПС Рябина	СПС Ива	СПС Клен	СПС Липа	СПС Вяз
1	22,5	0,55	24,6	0,00	4,43	9,64	2,50	3,07	0,07	1,21	0,07	0,43	1,00	2,00
2	22,3	0,47	20,8	0,14	6,19	4,65	2,46	1,54	2,96	0,56	0,20	0,56	0,99	0,42
3	25,8	0,55	25,1	0,00	6,35	5,00	6,53	1,24	3,06	0,00	0,59	0,24	0,18	1,82
4	23,3	0,47	20,8	0,03	5,82	5,55	3,11	0,70	1,23	0,77	0,50	1,08	1,27	0,52
5	23,2	0,39	20,0	1,22	7,67	4,62	3,22	0,22	0,49	0,49	0,17	0,84	0,82	0,13
6	17,9	0,35	17,8	1,90	9,49	4,01	0,91	0,15	0,04	0,71	0,03	0,25	0,29	0,01
7	18,1	0,48	22,0	0,02	7,93	6,37	2,60	1,04	0,36	0,71	0,84	0,53	1,14	0,40
8	16,5	0,30	13,6	0,13	6,39	3,39	2,16	0,45	0,00	0,32	0,21	0,39	0,05	0,05
9	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2,3	0,04	1,8	1,60	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,1	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1,8	0,03	0,2	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1,3	0,02	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	3,3	0,03	0,1	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	19,8	0,25	19,8	0,00	7,25	3,53	0,83	1,48	0,17	0,30	1,02	0,31	2,33	2,58
17	20,0	0,38	27,6	1,70	12,50	10,00	0,50	1,50	0,00	0,00	0,90	0,00	0,20	0,20
18	23,9	0,38	21,9	0,20	10,99	3,83	2,86	0,56	0,39	0,81	0,19	0,69	1,11	0,28
19	23,8	0,42	23,4	0,00	8,97	5,08	3,33	1,75	0,15	0,77	0,52	0,58	1,04	1,07
20	24,0	0,37	21,2	0,47	10,90	3,17	1,92	0,81	0,11	1,32	0,31	1,00	0,67	0,49
21	16,8	0,45	17,8	0,00	9,37	2,92	3,03	0,20	0,02	0,75	0,22	0,47	0,34	0,41
22	23,0	0,40	21,3	2,37	14,18	3,15	0,89	0,01	0,00	0,44	0,05	0,14	0,08	0,01
23	15,1	0,31	20,6	12,26	4,91	2,22	0,98	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
24	24,4	0,42	20,8	0,05	10,76	4,04	3,18	0,35	0,32	0,78	0,11	0,72	0,33	0,09
25	22,3	0,44	22,6	0,03	11,83	6,23	1,29	0,92	0,00	1,16	0,25	0,48	0,31	0,10

26	25,2	0,37	21,7	0,68	14,13	2,37	2,67	0,03	0,06	1,14	0,04	0,29	0,21	0,06
27	22,0	0,44	20,9	1,78	14,01	2,89	1,40	0,18	0,00	0,57	0,07	0,01	0,00	0,00
28	19,1	0,36	22,0	0,01	14,06	3,60	1,70	0,21	0,00	1,43	0,15	0,54	0,13	0,13
29	21,9	0,45	21,1	0,53	14,11	2,45	1,76	0,24	0,23	1,04	0,13	0,47	0,00	0,12
30	17,6	0,40	20,9	0,10	6,35	6,46	2,21	2,62	0,19	0,81	0,75	0,12	0,87	0,37
31	19,5	0,41	20,1	0,00	7,76	4,63	0,95	0,74	0,00	0,95	0,66	1,63	1,13	0,76
32	11,2	0,29	14,6	0,00	3,00	1,00	0,50	7,56	0,00	0,31	0,63	0,00	0,19	1,25
33	20,2	0,29	16,5	0,00	5,25	3,61	1,22	1,49	0,00	0,59	0,24	0,59	2,29	1,18
34	8,4	0,15	6,0	0,14	1,29	1,14	0,00	1,14	0,24	0,19	0,14	0,52	1,05	0,10
35	18,9	0,39	18,8	0,48	8,94	4,65	2,55	1,65	0,00	0,29	0,10	0,13	0,06	0,00
36	14,2	0,23	10,8	0,46	7,46	1,69	0,54	0,46	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08
37	21,8	0,44	22,5	0,00	12,62	4,00	2,00	2,42	0,42	0,46	0,27	0,15	0,00	0,00
38	2,0	0,09	0,9	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	3,9	0,10	4,4	0,00	2,22	0,00	0,00	2,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
41	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Приложение 5 Качественные характеристики древостоя, на основе средних значений на класс

	Сомкнутость	Высота древостоя	СПС	Сосна	Ель	Береза	Осина	Ольха серая	Ольха чер.	Рябина	Ива	Клен	Липа	Вяз
1	сильносомкнутые	средневысокие	сильнополнотные		мало	много	средне	средне	мало	много	мало	мало	средне	много
2	сильносомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	средне	мало	много	мало	мало	мало	средне	мало
3	среднесомкнутые	высокие	сильнополнотные		средне	средне	много	мало	много		средне	мало	мало	средне
4	сильносомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	мало	средне	средне	мало	средне	средне	средне	средне	много	средне
5	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	средне	мало	мало	мало	мало	средне	средне	мало
6	среднесомкнутые	средневысокие	среднеполнотные	мало	средне	средне	мало	мало	мало	средне	мало	мало	мало	мало
7	среднесомкнутые	средневысокие	среднеполнотные	мало	средне	средне	средне	мало	мало	средне	много	мало	средне	мало
8	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	средне	мало		мало	мало	мало	мало	мало
9														
10	слабосомкнутые	невысокие	слабополнотные	мало		мало								
11														
12														
13	слабосомкнутые	невысокие	слабополнотные	мало										
14	слабосомкнутые	невысокие												
15	слабосомкнутые	невысокие	слабополнотные	мало										
16	слабосомкнутые	средневысокие	среднеполнотные		средне	средне	мало	мало	мало	мало	много	мало	много	много
17	среднесомкнутые	средневысокие	среднеполнотные	мало	много	много	мало	мало			много		мало	мало
18	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	средне	мало	мало	средне	мало	средне	средне	мало
19	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные		средне	средне	средне	мало	мало	средне	средне	мало	средне	средне
20	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	мало	мало	мало	много	средне	средне	средне	мало
21	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные		средне	мало	средне	мало	мало	средне	мало	мало	мало	мало
22	среднесомкнутые	средневысокие	среднеполнотные	мало	много	средне	мало	мало		мало	мало	мало	мало	мало
23	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	много	мало	мало	мало			мало				
24	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	средне	мало	мало	средне	мало	средне	мало	мало
25	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	мало	мало		средне	мало	мало	мало	мало
26	среднесомкнутые	высокие	сильнополнотные	мало	много	мало	средне	мало	мало	средне	мало	мало	мало	мало

27	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	много	мало	мало	мало		мало	мало	мало		
28	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	много	средне	мало	мало		много	мало	мало	мало	мало
29	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	много	мало	мало	мало	мало	средне	мало	мало		мало
30	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные	мало	средне	средне	средне	средне	мало	средне	много	мало	средне	мало
31	среднесомкнутые	средневысокие	сильнополнотные		средне	средне	мало	мало		средне	средне	много	средне	средне
32	слабосомкнутые	невысокие	сильнополнотные		мало	мало	мало	много		мало	средне		мало	средне
33	слабосомкнутые	средневысокие	среднеполнотные		мало	средне	мало	мало		мало	мало	мало	много	средне
34	слабосомкнутые	невысокие	слабополнотные	мало	мало	мало		мало	мало	мало	мало	мало	средне	мало
35	среднесомкнутые	средневысокие	среднеполнотные	мало	средне	средне	средне	мало		мало	мало	мало	мало	
36	слабосомкнутые	невысокие	среднеполнотные	мало	средне	мало	мало	мало			мало			мало
37	среднесомкнутые	средневысокие	среднеполнотные		много	средне	средне	средне	мало	мало	мало	мало		
38	слабосомкнутые	невысокие	слабополнотные			мало								
39														
40	слабосомкнутые	невысокие	слабополнотные		мало			средне						
41														

Приложение 6 Средние значения проективного покрытия травяно-кустарничкового и мохового яруса на класс

	ПП травяно-кустарничкового яруса	ПП мохового яруса	ПП Долгомошников	ПП Зеленомошников	ПП Сфагнома
1	53,87	6,20	0,00	0,87	5,33
2	53,94	6,22	0,43	2,85	2,94
3	61,40	8,47	0,00	5,60	2,87
4	50,04	16,29	1,16	5,07	10,06
5	47,63	34,87	3,43	2,96	28,48
6	40,15	61,66	3,08	5,17	53,41
7	54,98	15,60	0,92	6,54	8,14
8	43,24	41,79	3,26	0,74	40,42
9	34,50	97,28	7,04	0,50	89,74
10	38,13	87,76	4,98	0,13	95,15
11	51,05	92,56	1,31	0,00	91,25
12	31,36	99,72	2,28	0,00	97,45
13	40,82	87,23	3,15	0,00	89,97
14	39,43	85,42	3,35	0,39	90,26
15	54,09	95,32	5,96	0,25	89,11
16	52,08	13,24	0,05	8,20	4,99
17	73,33	28,83	1,67	13,83	13,33
18	56,78	10,01	0,21	3,14	6,66
19	54,79	6,46	0,25	5,04	1,18
20	52,00	7,66	0,81	2,96	3,90
21	53,53	10,67	0,25	7,50	2,92
22	38,00	63,81	2,92	10,30	50,59
23	43,92	82,63	4,58	11,08	66,97
24	46,24	22,00	2,01	5,43	14,55
25	48,48	15,52	1,08	8,41	6,02
26	49,58	22,80	1,51	6,04	15,25
27	33,41	62,92	3,80	15,41	43,72
28	44,25	17,14	1,52	10,08	5,54
29	46,18	20,48	0,18	11,74	8,56
30	59,62	6,43	0,82	5,47	0,14
31	63,19	9,81	2,33	3,44	4,05
32	73,10	8,76	4,76	3,98	0,02
33	66,03	8,54	0,15	2,74	5,64
34	66,42	17,23	0,00	2,35	14,88
35	55,18	11,28	0,06	3,24	7,97
36	42,36	22,46	0,68	5,39	16,39
37	63,66	5,28	0,45	2,12	2,71
38	68,07	0,71	0,00	0,71	0,00
39	79,44	3,33	0,00	3,06	0,28
40	83,46	8,46	2,69	1,54	4,23
41	85,44	0,94	0,00	0,94	0,00

**Приложение 7 Качественная характеристика проективного покрытия
травяно-кустарничкового и мохового яруса классов**

	ПП травяно- кустарничк ого яруса	ПП мохового яруса	ПП Долгомошников	ПП Зеленомошников	ПП Сфагнома
1	средне	очень мало		очень мало	очень мало
2	средне	очень мало	очень мало	очень мало	очень мало
3	средне	очень мало		мало	очень мало
4	мало	очень мало	очень мало	мало	очень мало
5	мало	мало	очень мало	очень мало	мало
6	мало	средне	очень мало	мало	мало
7	средне	очень мало	очень мало	мало	очень мало
8	мало	мало	очень мало	очень мало	мало
9	мало	много	средне	очень мало	много
10	мало	много	очень мало	очень мало	средне
11	средне	много	очень мало		средне
12	мало	много	очень мало		много
13	мало	средне	очень мало		средне
14	мало	много	очень мало	очень мало	средне
15	средне	средне	очень мало	очень мало	средне
16	средне	очень мало	очень мало	мало	очень мало
17	средне	мало	очень мало	средне	очень мало
18	средне	очень мало	очень мало	мало	очень мало
19	средне	очень мало	очень мало	мало	очень мало
20	средне	очень мало	очень мало	мало	очень мало
21	средне	очень мало	очень мало	мало	очень мало
22	мало	средне	очень мало	средне	мало
23	мало	много	очень мало	мало	мало
24	мало	мало	очень мало	мало	очень мало
25	мало	очень мало	очень мало	мало	очень мало
26	мало	мало	очень мало	мало	очень мало
27	мало	средне	очень мало	средне	мало
28	мало	очень мало	очень мало	мало	очень мало
29	мало	очень мало	очень мало	мало	очень мало
30	средне	очень мало	очень мало	мало	очень мало

31	средне	очень мало	очень мало	очень мало	очень мало
32	средне	очень мало	средне	мало	очень мало
33	средне	очень мало	очень мало	очень мало	очень мало
34	средне	очень мало		очень мало	очень мало
35	средне	очень мало	очень мало	очень мало	очень мало
36	мало	мало	очень мало	мало	очень мало
37	средне	очень мало	очень мало	очень мало	очень мало
38	средне				
39	много	очень мало		очень мало	очень мало
40	много	очень мало	очень мало	очень мало	очень мало
41	много				

Приложение 8 Классы травяно-кустарничкового яруса и доминантные виды

№	Класс травяно-кустарничкового яруса	Доминанты
1	Неморально-бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Stellaria nemorum</i> , <i>Dryopteris dilatata</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i>
2	Неморально-бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Stellaria nemorum</i>
3	Неморально-богатовлажнотравный	<i>Urtica dioica</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Dryopteris dilatata</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Geum rivale</i> , <i>Gymnocarpium dryopteris</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Phegopteris connectilis</i>
4	(Неморально)-бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Dryopteris dilatata</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Stellaria holostea</i> ,
5	Бореальный	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Trientalis europaea</i>
6	Бореальный	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i>
7	(Неморально)-бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Dryopteris dilatata</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Maianthemum bifolium</i>
8	Влажнотравно-бореальный	<i>Carex vesicaria</i> , <i>Dryopteris dilatata</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i>
9	Влажнотравный болотный (олиготрофный)	<i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Oxycoccus palustris</i> , <i>Scheuchzeria palustris</i> , <i>Andromeda polifolia</i> , <i>Drosera rotundifolia</i> , <i>Chamaedaphne calyculata</i>
10	Влажнотравный болотный (олиготрофный)	<i>Oxycoccus palustris</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Scheuchzeria palustris</i> , <i>Andromeda polifolia</i> , <i>Chamaedaphne calyculata</i>

11	Влажнотравный болотный (олиготрофный)	<i>Carex vesicaria</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Oxycoccus palustris</i> <i>Scheuchzeria palustris</i> , <i>Andromeda polifolia</i>
12	Бореально-влажнотравный болотный (олиготрофный)	<i>Menyanthes trifoliata</i> , <i>Andromeda polifolia</i> , <i>Carex vesicaria</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Chamaedaphne calyculata</i>
13	Влажнотравный болотный (мезотрофный)	<i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Andromeda polifolia</i> , <i>Melampyrum pratense</i> , <i>Oxycoccus palustris</i> , <i>Chamaedaphne calyculata</i>
14	Влажнотравный болотный(мезотрофный)	<i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Andromeda polifolia</i> , <i>Melampyrum pratense</i> , <i>Oxycoccus palustris</i> , <i>Chamaedaphne calyculata</i>
15	Влажнотравный болотный (олиготрофный)	<i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Oxycoccus palustris</i> , <i>Chamaedaphne calyculata</i>
16	Бореально-влажнотравный	<i>Mercurialis perennis</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Filipendula ulmaria</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Solidago virgaurea</i> , <i>Aegopodium podagraria</i>
17	Богатовлажнотравно-Неморальный	<i>Mercurialis perennis</i> , <i>Galium odoratum</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Asarum europaeum</i>
18	Бореальный	<i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Gymnocarpium Dryopteris</i> , <i>Trientalis europaea</i> , <i>Phegopteris connectilis</i>
19	Бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Stellaria holostea</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i>
20	Бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Gymnocarpium Dryopteris</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Phegopteris connectilis</i>
21	(Неморально)- бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Gymnocarpium Dryopteris</i> , <i>Stellaria holostea</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Solidago virgaurea</i> , <i>Trientalis europaea</i>
22	Бореальный	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i>
23	Бореально-влажнотравный болотный	<i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Chamaedaphne calyculata</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Ledum palustre</i>
24	Бореальный	<i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Trientalis europaea</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i>
25	Бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Gymnocarpium dryopteris</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Trientalis europaea</i> , <i>Solidago virgaurea</i>
26	Бореальный	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Trientalis europaea</i> , <i>Dryopteris dilatata</i>
27	Бореальный	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Dryopteris dilatate</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Oxalis acetosella</i>
28	(Неморально)- бореальный	<i>Oxalis acetosella</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Gymnocarpium Dryopteris</i> , <i>Luzula pilosa</i> , <i>Stellaria holostea</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i>
29	Влажнотравно-(неморально) бореальный	<i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Solidago virgaurea</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Stellaria holostea</i> , <i>Angelica sylvestris</i>

30	(Неморально)- бореальный	<i>Galeobdolon luteum, Stellaria holostea, Oxalis acetosella, Dryopteris dilatata, Gymnocarpium dryopteris</i>
31	Богатовлажнотравный	<i>Geum rivale, Urtica dioica, Angelica sylvestris, Galeobdolon luteum</i>
32	Бореально-Богатовлажнотравный	<i>Galeobdolon luteum, Geum rivale, Urtica dioica, Angelica sylvestris, Filipendula ulmaria</i>
33	Неморальный	<i>Stellaria holostea, Aegopodium podagraria, Hepatica nobilis, Pulmonaria obscura, Galeobdolon luteum</i>
34	Влажнотравно-неморальный	<i>Filipendula ulmaria, Hypericum perforatum, Geum rivale, Veronica chamaedrys</i>
35	Бореальный	<i>Oxalis acetosella, Gymnocarpium dryopteris, Solidago virgaurea, Luzula pilosa</i>
36	(Неморально)- бореальный	<i>Dryopteris dilatata, Stellaria holostea, Oxalis acetosella</i>
37	Бореальный	<i>Oxalis acetosella, Equisetum sylvaticum, Gymnocarpium Dryopteris, Trientalis europaea</i>
38	Луговой	<i>Hypericum perforatum, Rumex acetosella, Trifolium pratense, Veronica chamaedrys, Anthoxanthum odoratum</i>
39	Луговой	<i>Hypericum perforatum, Taraxacum officinale, Achillea millefolium, Alchemilla vulgaris, Ranunculus acris</i>
40	Богатовлажнотравно-луговой	<i>Urtica dioica, Ranunculus acris, Alchemilla vulgaris, Festuca pratensis</i>
41	Луговой (богатовлажнотравный)	<i>Geum rivale, Anthriscus sylvestris, Dactylis glomerata, Ranunculus acris, Luzula multiflora, Potentilla erecta, Urtica dioica,</i>

Приложение 9 Количество почвенных генетических горизонтов и мощность почвы

№	Мощность почвы		Количество почв. горизонтов	
1	51	маломощная	7	Почва средней сложности
2	60	маломощная	7	Почва средней сложности
3	78	среднемощная	8	Почва средней сложности
4	52	маломощная	6	Просто устроенная почва
5	45	маломощная	6	Просто устроенная почва
6	23	маломощная	5	Просто устроенная почва
7	67	среднемощная	8	Почва средней сложности
8	41	маломощная	6	Просто устроенная почва
9	Верховой торф со средней мощностью более 2 м			
10				
11				
12				
13				
14				

15				
16	66	среднемощная	8	Почва средней сложности
17	93	мощная	9	Сложноустроенная почва
18	74	среднемощная	8	Почва средней сложности
19	89	мощная	8	Почва средней сложности
20	82	мощная	9	Сложноустроенная почва
21	91	мощная	8	Почва средней сложности
22	52	маломощная	7	Почва средней сложности
23	18	маломощная	6	Просто устроенная почва
24	71	среднемощная	8	Почва средней сложности
25	76	среднемощная	8	Почва средней сложности
26	86	мощная	9	Сложноустроенная почва
27	77	среднемощная	8	Почва средней сложности
28	82	мощная	9	Сложноустроенная почва
29	77	среднемощная	8	Почва средней сложности
30	77	среднемощная	8	Почва средней сложности
31	75	среднемощная	8	Почва средней сложности
32	70	среднемощная	8	Почва средней сложности
33	66	среднемощная	7	Почва средней сложности
34	82	мощная	7	Почва средней сложности
35	77	среднемощная	9	Сложноустроенная почва
36	51	маломощная	7	Почва средней сложности
37	65	среднемощная	8	Почва средней сложности
38	86	мощная	6	Просто устроенная почва
39	114	мощная	8	Почва средней сложности
40	81	мощная	7	Почва средней сложности
41	81	мощная	6	Просто устроенная почва

Приложение 10 Верхние границы вскипаемости (реакция с HCl),
оглеения, наличия Fe-Mn конкреций

	Верхняя граница					
	Вскипаемости		Наличия Fe-Mn конкреций		Оглеения	
	В какой части почвенного профиля					
1	40,1	в средней	60	в нижней	18,3	в средней
2	47,0	в средней	29	в средней	15,2	в средней
3	58,8	в средней	27	в средней	22,1	в средней
4	43,0	в средней	19	в верхней	14,9	в верхней
5	34,8	в средней	29	в средней	15,9	в средней
6	45,2	в средней	27	в средней	9,4	в верхней
7	61,7	в средней	14	в верхней	21,2	в средней
8	41,4	в средней	17	в верхней	6,6	в верхней
9						
10					44,4	в нижней
11						

12						
13					22,7	в средней
14					41,4	в нижней
15	36,9	в средней			11,9	в верхней
16	70,5	в нижней	68	в нижней	36,7	в нижней
17	30,0	в средней	39	в средней	30,0	в нижней
18	70,3	в нижней	21	в средней	21,9	в средней
19	64,1	в средней	33	в средней	8,3	в верхней
20	85,7	в нижней	25	в средней	12,2	в верхней
21	34,3	в средней	30	в средней	13,6	в верхней
22	44,6	в средней	37	в средней	42,4	в нижней
23	42,6	в средней	54	в нижней	28,6	в средней
24	50,8	в средней	28	в средней	22,9	в средней
25	60,1	в средней	30	в средней	23,0	в средней
26	77,6	в нижней	23	в средней	18,5	в средней
27	53,8	в средней	29	в средней	24,7	в средней
28	32,7	в средней	20	в верхней	14,5	в верхней
29	55,3	в средней	23	в средней	19,8	в средней
30	39,4	в средней	36	в средней	16,5	в средней
31	43,0	в средней	32	в средней	7,7	в верхней
32	73,3	в нижней	49	в нижней	21,9	в средней
33	57,1	в средней	26	в средней	23,2	в средней
34	44,4	в средней	27	в средней	5,0	в верхней
35	68,4	в средней	40	в нижней	11,1	в верхней
36	68,5	в средней	26	в средней	1,1	в верхней
37	94,3	в нижней	37	в средней	9,9	в верхней
38	41,3	в средней	31	в средней	8,8	в верхней
39	86,4	в нижней	19	в верхней		
40	50,5	в средней	36	в средней	39,6	в нижней
41	1,9	в верхней	21	в верхней	38,6	в нижней

Приложение 11 Средние мощности почвенных горизонтов на класс

	Мощность почвенных горизонтов													
	Суммарная мощность органики		Торф		A1		A1A2		A2		A2B		B	
1	15	мало	0,9	маломощный	8,6	слабодерновый	5,1	среднемощный	10,3	среднеподзолистый	10,4	среднемощный	16,4	маломощный
2	10,9	мало	5,0	маломощный	9,4	слабодерновый	6,1	мощный	8,5	слабоподзолистый	14,6	среднемощный	20,9	среднемощный
3	10,5	мало	3,3	маломощный	8,5	слабодерновый	9,8	мощный	10,8	среднеподзолистый	14,0	среднемощный	34,5	среднемощный
4	21,3	средне	17,1	среднемощный	5,0	слабодерновый	5,3	среднемощный	10,7	среднеподзолистый	7,0	среднемощный	24,4	среднемощный
5	32,1	средне	28,2	среднемощный	3,5	слабодерновый	3,2	среднемощный	7,8	слабоподзолистый	11,2	среднемощный	18,8	маломощный
6	86,0	много	79,2	мощный	0,7	слабодерновый	1,9	маломощный	4,7	слабоподзолистый	4,5	маломощный	11,4	маломощный
7	14,3	мало	10,5	маломощный	7,9	слабодерновый	5,0	среднемощный	10,1	среднеподзолистый	14,0	среднемощный	29,7	среднемощный
8	88,2	много	78,3	много	4,7	слабодерновый	1,8	маломощный	7,0	слабоподзолистый	5,2	среднемощный	21,8	среднемощный
9	289,0													
10	223,8													
11	390,0													
12	265,0													
13	267,3													
14	336,3													
15	255,0													
16	13,3	мало	4,7	маломощный	6,9	слабодерновый	6,1	мощный	6,2	слабоподзолистый	18,6	мощный	28,1	среднемощный

17	6,5	мало	2,0	маломощный	8,8	слабодерновый	8,5	мощный	8,0	слабоподзолистый	14,5	среднемощный	52,7	
18	11,0	мало	5,9	маломощный	7,1	слабодерновый	5,2	среднемощный	11,1	среднеподзолистый	13,2	среднемощный	37,8	среднемощный
19	4,7	мало	1,2	маломощный	9,1	слабодерновый	6,3	мощный	10,8	среднеподзолистый	23,6	мощный	39,7	среднемощный
20	7,2	мало	3,5	маломощный	8,6	слабодерновый	5,1	среднемощный	11,7	среднеподзолистый	19,0	мощный	37,1	среднемощный
21	6,7	мало	3,1	маломощный	8,0	слабодерновый	5,2	среднемощный	9,6	слабоподзолистый	22,0	мощный	46,0	мощный
22	38,5	средне	32,5	среднемощный	3,6	слабодерновый	2,9	маломощный	9,0	слабоподзолистый	14,6	среднемощный	21,9	среднемощный
23	151,1	очень много	145,1	мощный	2,5	слабодерновый	0,7	маломощный	4,1	слабоподзолистый	3,7	маломощный	7,1	маломощный
24	11,9	мало	7,2	маломощный	6,1	слабодерновый	4,2	среднемощный	12,8	среднеподзолистый	15,6	мощный	32,6	среднемощный
25	10,0	мало	6,0	маломощный	8,3	слабодерновый	3,4	среднемощный	13,5	среднеподзолистый	20,4	мощный	30,4	среднемощный
26	14,0	мало	9,6	маломощный	5,1	слабодерновый	2,9	маломощный	16,3	среднеподзолистый	17,6	мощный	44,2	мощный
27	58,6	средне	52,9	среднемощный	2,2	слабодерновый	2,7	маломощный	17,9	среднеподзолистый	14,8	среднемощный	39,0	среднемощный
28	10,6	мало	6,5	маломощный	5,7	слабодерновый	4,2	среднемощный	11,4	среднеподзолистый	25,9	мощный	34,4	среднемощный
29	7,6	мало	2,8	маломощный	6,7	слабодерновый	3,4	среднемощный	13,2	среднеподзолистый	14,7	среднемощный	38,9	среднемощный

30	3,8	мало	0,5	маломощный	12,7	среднедерновый	3,2	среднемошный	6,7	слабоподзолистый	19,5	мощный	35,5	среднемошный
31	6,4	мало	2,8	маломощный	12,6	среднедерновый	4,3	среднемошный	10,3	среднеподзолистый	18,8	мощный	29,3	среднемошный
32	10,5	мало	7,7	маломощный	16,8	среднедерновый	6,8	мощный	6,4	слабоподзолистый	12,2	среднемошный	27,5	среднемошный
33	21,2	средне	15,0	среднемошный	9,7	слабодерновый	5,3	среднемошный	7,9	слабоподзолистый	14,4	среднемошный	29,0	среднемошный
34	39,1	средне	33,3	среднемошный	13,0	среднедерновый	3,9	среднемошный	8,2	слабоподзолистый	24,8	мощный	31,8	среднемошный
35	12,5	мало	8,5	маломощный	5,8	слабодерновый	7,7	мощный	10,3	среднеподзолистый	18,9	мощный	34,1	среднемошный
36	89,7	много	85,4	мощный	8,1	слабодерновый	8,4	мощный	11,8	среднеподзолистый	5,9	среднемошный	17,0	маломощный
37	11,4	мало	4,5	маломощный	8,6	слабодерновый	5,5	среднемошный	10,2	среднеподзолистый	16,8	мощный	23,7	среднемошный
38	1,3	мало	Торфа нет		26,7	сильнодерновый	5,6	среднемошный	6,5	слабоподзолистый	5,2	среднемошный	41,9	мощный
39	1,8	мало			20,5	сильнодерновый	2,2	маломощный	16,0	среднеподзолистый	16,0	мощный	59,1	мощный
40	5,8	мало			22,1	сильнодерновый	2,9	маломощный	3,9	слабоподзолистый	7,3	среднемошный	44,8	мощный
41	6,2	мало			21,4	сильнодерновый	6,8	мощный	8,2	слабоподзолистый	7,9	среднемошный	36,3	среднемошный

Приложение 12 Гранулометрический состав почв

	Гранулометрический состав горизонтов															
	A1		A1A2		A2		A2B		B		BC		C		G	
1	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5	Легкий суглинок	4	Средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
2	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5	Легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
3	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5	Легкий суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	4	Средний суглинок		
4	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5	Легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	4	Средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	5	Легкий суглинок
5	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	4	Средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	5	Легкий суглинок
6	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5.5	Супесь	4.5	Средний-легкий суглинок	4	Средний суглинок
7	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5	Легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	5	Легкий суглинок
8	4.5	Легкий-средний суглинок	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок -Супесь	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	4.5	Средний-легкий суглинок	4	Средний суглинок	4	Средний суглинок	5	Легкий суглинок
9													5	Легкий суглинок		
10													5	Легкий суглинок		
11													5	Легкий суглинок		
12													5	Легкий суглинок		

13													4.5	Средний-легкий суглинок		
14													4.5	Средний-легкий суглинок		
15													4.5	Средний-легкий суглинок	5	Легкий суглинок
16	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	4	Средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
17	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	5.5	Супесь	3.5	Тяжелый-средний суглинок	4	Средний суглинок	4	Средний суглинок		
18	5-5.5	Легкий суглинок - супесь	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5.5	Супесь	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5.5	Супесь	3.5	Тяжелый-средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	4.5	Легкий-средний суглинок
19	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
20	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5	Легкий суглинок	5.5	Супесь	4.5	Средний-легкий суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	5	Легкий суглинок
21	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
22	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5	Легкий суглинок	5.5	Супесь	5.5	Супесь	4.5	Средний-легкий суглинок	5	Легкий суглинок
23	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5.5	Супесь	5.5	Супесь	5.5	Супесь	5.5	Супесь	5	Легкий суглинок	4.5	Легкий-средний суглинок
24	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5	Легкий суглинок	5.5	Супесь	4	Средний суглинок	4	Средний суглинок		

37	5-5.5	Легкий суглинок - супесь	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	5	Легкий суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	4	Средний суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
38	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5	Легкий суглинок	5-5.5	Легкий суглинок - Супесь	4	Средний суглинок	4.5	Средний-легкий суглинок	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
39	5-5.5	Легкий суглинок - супесь	5	Легкий суглинок	5.5	Супесь	5.5-6	Супесь-мелкозернистый песок	6.5	Мелко-среднезернистый песок	5.5	Супесь	3.5	Тяжелый-средний суглинок		
40	5.5	Супесь	5.5	Супесь	5.5	Супесь	5.5	Супесь	6	Мелкозернистый песок	5.5	Супесь	4.5	Средний-легкий суглинок		
41	5.5	Супесь	5.5	Супесь	5.5	Супесь	5.5	Супесь	6	Мелкозернистый песок	5.5	Супесь	4.5	Средний-легкий суглинок		

Приложение 13 Цвет почвы по шкале Манселла. Горизонты O, A1, A1A2, A2.

Hue (H), Value (V), Chroma (C)

	Горизонты											
	A1				A1A2				A2			
	H	V	C		H	V	C		H	V	C	
1	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
2	10YR	3	1	очень темно-серый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
3	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
4	10YR	3	2	очень темно-сероватокоричневый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
5	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	3	коричневый
6	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	4	1	темно-серый	10YR	6	3	палево-коричневый
7	10YR	3	1	очень темно-серый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
8	7.5YR	2	1	черный	10YR	4	4	темно-желтоватокоричневый	10YR	5	8	очень желтовато-коричневый
9												

10												
11												
12												
13												
14												
15												
16	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	3	коричневый
17	10YR	3	1	очень темно-серый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый
18	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	3	коричневый
19	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
20	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	2	серовато-коричневый
21	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	3	коричневый
22	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	3	коричневый
23	10YR	2	1	черный	10YR	4	1	темно-серый	10YR	6	2	светло коричневатый
24	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	3	коричневый
25	10YR	2	2	очень черный	10YR	4	3	коричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
26	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	6	3	палево-коричневый
27	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	2	серовато-коричневый
28	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
29	10YR	2	1	черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	2	серовато-коричневый
30	10YR	3	2	очень темно-сероватокоричневый	10YR	4	4	темно-желтоватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
31	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
32	10YR	3	2	очень темно-сероватокоричневый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
33	10YR	3	2	очень темно-сероватокоричневый	10YR	3	3	темно-коричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
34	10YR	3	2	очень темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
35	10YR	3	1	очень темно-серый	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
36	10YR	3	2	очень темно-сероватокоричневый	10YR	4	3	коричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый

37	10YR	2	2	очень черный	10YR	4	2	темно-сероватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
38	10YR	4	4	темно-желтоватокоричневый	10YR	5	2	серовато-коричневый	10YR	5	3	коричневый
39	10YR	4	3	коричневый	10YR	4	4	темно-желтоватокоричневый	10YR	5	4	желтовато-коричневый
40	7.5YR	3	3	темно-коричневый	10YR	5	8	желтовато-коричневый	10YR	6	3	палево-коричневый
41	7.5YR	4	3	коричневый	10YR	4	4	темно-желтоватокоричневый	10YR	6	4	желтовато-коричневый

Приложение 14 Цвет почвы по шкале Манселла. Горизонты A2B, B, BC, C

Hue (H), Value (V), Chroma (C)

	Горизонты											
	A2B				B				C			
	H	V	C		H_	V	C_		H	V	C	
1	10YR	5	4	желтовато-коричневый	7.5YR	4	6	насыщенный коричневый	10YR	4	6	темно желтовато-коричневый
2	10YR	5	4	желтовато-коричневый	7.5YR	4	6	коричневый	5YR	4	4	темно желтовато-коричневый
3	10YR	5	4	желтовато-коричневый	7.5YR	4	4	коричневый	7.5YR	4	6	насыщенный коричневый
4	10YR	5	6	желтовато-коричневый	7.5YR	4	6	насыщенный коричневый	7.5YR	4	6	насыщенный коричневый
5	10YR	5	8	желтовато-коричневый	7.5YR	5	8	желтовато-коричневый	10YR	5	8	желтовато-коричневый
6	7.5YR	5	8	желтовато-коричневый	7.5YR	5	8	желтовато-коричневый	10YR	4	2	
7	10YR	5	4	желтовато-коричневый	7.5YR	5	8	желтовато-коричневый	7.5YR	4	6	насыщенный коричневый
8	10YR	5	8	светло-желтоватокоричневый	7.5YR	4	6	насыщенный коричневый	7.5YR	4	4	коричневый
9									5Y	5	2	оливково-серый
10									5Y	4	1	темно-серый
11									5Y	4	2	оливково-серый
12									10YR	4	2	темно-сероватокоричневый
13									10Y	4	1	темно-серый
14									5Y	4	2	оливково-серый
15									10YR	5	1	серый
16	10YR	4	4	темно-желтоватокоричневый	7.5YR	4	6	насыщенный коричневый	5YR	5	4	красновато-коричневый

Приложение 15 Верификация полученных классов по длинноволновым данным сцен Landsat. Средние температуры на класс, рассчитанные на основе зимнего и летнего инварианта тепловых полей

№	Температура зимой	Температура летом	Температура зимой	Температура летом
1	-15,27	21,11	тепло	прохладно
2	-15,01	21,05	тепло	прохладно
3	-15,01	21,12	тепло	прохладно
4	-14,84	21,13	тепло	прохладно
5	-14,66	20,90	тепло	прохладно
6	-14,51	21,27	тепло	прохладно
7	-14,76	21,23	тепло	прохладно
8	-14,69	21,46	тепло	прохладно
9	-17,03	25,35	очень холодно	очень тепло
10	-16,93	25,45	очень холодно	очень тепло
11	-16,91	25,50	очень холодно	очень тепло
12	-15,48	23,13	тепло	тепло
13	-15,96	24,10	холодно	очень тепло
14	-16,54	25,03	очень холодно	очень тепло
15	-16,83	25,27	очень холодно	очень тепло
16	-15,19	21,00	тепло	прохладно
17	-15,09	20,77	тепло	прохладно
18	-14,88	20,88	тепло	прохладно
19	-15,10	21,27	тепло	прохладно
20	-14,95	21,05	тепло	прохладно
21	-15,03	21,03	тепло	прохладно
22	-14,53	21,03	тепло	прохладно
23	-14,77	21,82	тепло	тепло
24	-14,64	20,91	тепло	прохладно
25	-14,79	21,34	тепло	прохладно
26	-14,65	20,84	тепло	прохладно
27	-14,62	21,25	тепло	прохладно
28	-14,87	21,37	тепло	прохладно
29	-14,89	21,13	тепло	прохладно
30	-15,36	22,09	тепло	тепло
31	-15,34	22,42	тепло	тепло
32	-15,65	22,20	холодно	тепло
33	-15,24	22,04	тепло	тепло
34	-15,90	23,43	холодно	тепло
35	-15,69	22,70	холодно	тепло
36	-15,90	22,94	холодно	тепло
37	-16,15	22,88	холодно	тепло
38	-16,57	24,41	очень холодно	очень тепло

39	-16,59	24,53	очень холодно	очень тепло
40	-17,03	25,02	очень холодно	очень тепло
41	-16,98	24,76	очень холодно	очень тепло