

На правах рукописи

Байбар Анастасия Сергеевна

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

1.6.12 – физическая география и биогеография, география почв и геохимия
ландшафтов

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

**Работа выполнена в Отделе физической географии и проблем
природопользования
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт географии Российской академии наук (г. Москва)**

Научный руководитель:

Пузаченко Михаил Юрьевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела физической географии и проблем природопользования Института географии Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Хорошев Александр Владимирович, доктор географических наук, профессор кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Хромых Вадим Валерьевич, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой географии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета

Ведущая организация:

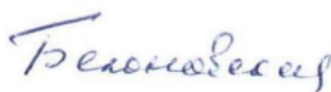
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Защита диссертации состоится 30 мая 2025 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.049.02 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4. Факс: (495) 959-00-16, e-mail: d00204603@igras.ru С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН и на интернет-сайте: <http://igras.ru>

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажном носителе в одном экземпляре) просим направлять по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4, Институт географии РАН, диссертационный совет 24.1.049.02, e-mail: d00204603@igras.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Белоновская Е.А

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. 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 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 динамических систем определяют уровень организации ландшафта. Естественно, что эту динамическую систему можно исследовать для различных временных интервалов (сутки, сезоны, многолетние циклы).

Накопление МДДЗ даёт возможность анализировать реальные ряды измерений функциональных переменных ландшафта, отображающих в первую очередь работу растительного покрова по преобразованию солнечной энергии. Этот подход создает основу максимально полного использования мультиспектральных дистанционных измерений со спутников и беспилотных летательных аппаратов в различных временных диапазонах.

Объект исследования: южно-таежный ландшафт юго-запада Валдайской возвышенности

Предмет исследования: пространственно-временные инварианты состояний южно-таежного ландшафта юго-запада Валдайской возвышенности

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

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 характеристикой полученных классов на основе полевых описаний и исходных данных.

Методология исследования.

Исследования базируются на теории сложных нелинейных систем (Хакен, 1980; Пузаченко, 1998, 2002, 2010), включает инструменты пространственного анализа (Пузаченко и др., 2002) и методы математической статистики: метод главных компонент, корреляционный, мультирегрессионный, дискриминантный и дисперсионный анализы.

В основу диссертации легли уникальные полевые материалы, полученные с 1993 по 2024 годы (3186 описаний растительности и 2358 почвенных описаний), временная серия безоблачных снимков Landsat 4 – 9 поколений с 1987 по 2022 год (19 сцен) и ЦМР, полученная на основе оцифровки топографической карты.

Научная новизна работы. Впервые мультиспектральная дистанционная информация более чем за 35 лет использована для выделения инвариантных состояний геосистем Центрально-Лесного заповедника и его окрестностей. 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.

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.

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 МДЦЗ 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.

Положения, выносимые на защиту

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.

Степень достоверности, апробация работы и публикации. Основные результаты работы представлены в 16 статьях, 4 из которых входит в перечень ВАК.

Материалы диссертации доложены на VIII национальной научной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (ЭкоМатМод-2023) (Пушино, Россия, 2023), на Международной научной конференции «Картографирование биоты: традиции и актуальные вопросы развития» (Иркутск, Россия, 2023), на VI Международной конференции "Мониторинг и оценка состояния растительного мира" (Минск-Лясковичи, Беларусь, 2023), на Международном конгрессе IALE «Transboundary Resource Management, Climate Change and Environmental Resilience»

(Найроби, Кения, 2023), на Международной ландшафтной конференции «Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии», VII Мильковские чтения (Воронеж, Россия, 2023), на Всероссийской с международным участием конференции ««Научные исследования и экологический мониторинг на особо охраняемых природных территориях России и сопредельных стран» (ЦЛГПБЗ, 2022), на Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС 26. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий» (Тбилиси, Грузия, 2020), на Международной конференции «Landscape Science and Landscape Ecology: Considering Responses to Global Challenges» (Москва, 2020), на Международном конгрессе «Nature and society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology» (Милан, Италия, 2019), на Международной ландшафтной конференции «Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов» (Воронеж, 2018), на Международной конференции «Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии» (Минск, 2018), на Международной научной конференции «Ломоносов- 2018» (Москва, 2018).

Автор принимал участие в грантах 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.; грант 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.)

Вклад автора в проведенное исследование.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в сборе полевого материала на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника с 2015 по 2024 год, в анализе отечественной и зарубежной научной литературы, в обработке данных дистанционного зондирования и верификации результатов, в систематизации полевых материалов, исправление ошибок в базе данных. описаний растительности и почвы. Основная заслуга автора – это участие в разработке авторского метода выделения ландшафтных инвариантов на основе МДДЗ и ЦМР.

Структура и объем работ. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка цитируемой литературы. Список литературы включает в себя 266 работ

(122 на русском и 144 на иностранных языках). Объем диссертации – 188 страниц машинописного текста без приложения, включая 36 таблиц, 59 рисунков.

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 искреннюю благодарность сотруднику ИГ РАН, к.г.н. А.Н. Кренке; руководителю МЛЛЭ НИУ ВШЭ, к.б.н. Р.Б. Сандлерскому; сотруднику ИПЭЭ 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 лаборатории биогеографии ИГ 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, ведущего научного сотрудника А.С. Желтухина и за помощь в организации полевых работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Инвариант, инвариант 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).

В последующие годы ввиду универсальности термина он был постепенно внедрен в различные науки: физику, программирование, экономику, лингвистику, философию и т.д. 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 десятилетия термин получил распространение в ландшафтоведении, однако, В.С. Преображенский, Т.Д. Александрова, Т.П. Куприянова отмечали на слабую проработанность теории и методологии инвариантов, (Преображенский, 1982, с. 400; 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).

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). А инвариант ландшафта – это не что иное, как его типовая структура (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. После переосмысления понятия Федором Николаевичем в научной литературе распространяется статическое представление об инварианте, в работах его учеников, как правило, инвариант связан с геоморфологической основой ландшафта.

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

Исследования Ю.Г. Пузаченко продолжили его ученики М.Ю. Пузаченко, А.Н. Кренке, Р.Б. Сандлерский, 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, 2018; 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), относительно которого они выделяли нарушения функционирования малого водного цикла в экосистеме (Bila, 2010, 2011).

Глава 2. Физико-географическая характеристика территории исследования

В главе кратко дана физико-географическая характеристика территории исследования – ядра и охранный зоны Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (ЦЛГЗ) и прилегающей территории. 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. и общей

площадью 139 200 га. Центрально-Лесной заповедник расположен в юго-западной части Валдайской возвышенности. Здесь сохранились уникальные массивы коренных южно-таежных ельников, нетронутые рубками.

Глава 3. Материалы и методы исследования

В главе дана характеристика используемых в исследовании снимков Landsat 4 – 9 поколений с 1987 по 2022 год (рис. 1). В общей сложности в работе использованы 19 безоблачных сцен, выполненных преимущественно в феврале, апреле и июне. А также описана база данных геоботанических и почвенных описаний. Показана методика выделения иерархических уровней рельефа на основе ЦМР и расчета морфометрических характеристик рельефа для каждого из них.

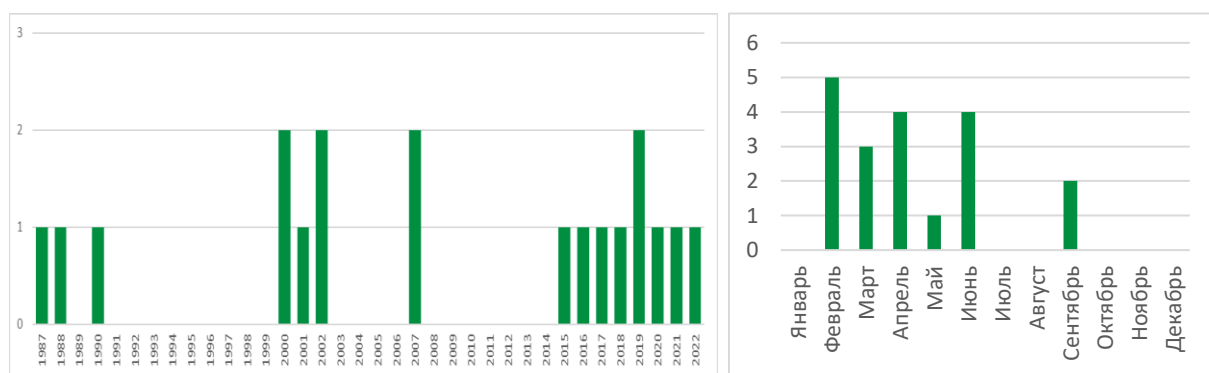


Рисунок 1 Количество снимков Landsat, используемых в исследовании, а) по годам, б) по месяцам

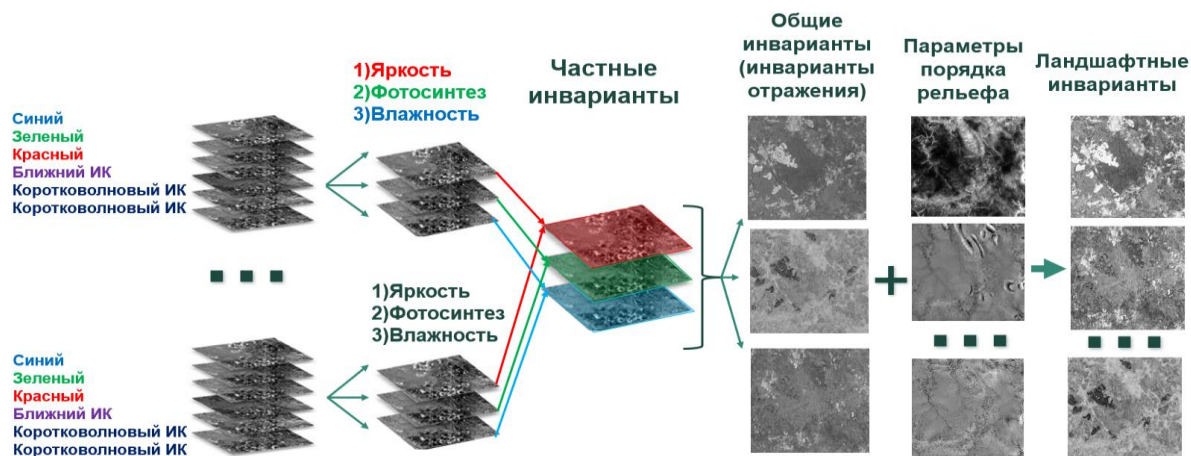


Рисунок 2 Алгоритм получения ландшафтных инвариантов на основе МДДЗ и ЦМР

Продемонстрирована методика обработки МДДЗ и ЦМР, алгоритм по уменьшению признакового пространства, от обобщения каналов каждой сцены, морфометрических параметров для разных иерархических уровней до интегральных ландшафтных инвариантов по всем каналам, срокам наблюдений и характеристикам рельефа (рис. 2).

Описана методика получения карты пространственно-временных состояний ландшафтов и принципы построения легенды.

Глава 4. Результаты исследования

В главе приведены результаты последовательного обобщения МДДЗ, подчеркивается биогеофизический смысл всех промежуточных результатов.

Выделение инвариантов производилось последовательно. На первом этапе методом главных компонент выполнено обобщение 6 каналов для каждого срока съемки. Для снежного периода (февраль-март) выделяется две компоненты для всех каналов: общая яркость всех каналов, яркость в коротковолновых ИК каналах (КИК). Для бесснежного периода выделяется 3 компоненты снимка: общая яркость всех каналов, яркость в ближнем ИК (БИК) и в коротковолновых ИК каналах (Таблица 1).

Таблица 1 Результаты обобщения шести каналов для каждого срока съемки.

№	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	
1	04/02/87	0.74	0	0.20	0.94
2	06/06/88	0.76	0.19	0.03	0.98
3	03/05/90	0.89	0.08	0.02	0.99
4	27/04/00	0.88	0.08	0.03	0.99
5	27/09/00	0.80	0.08	0.07	0.95
6	22/03/01	0.96	0	0.03	0.99
7	10/04/02	0.63	0.03	0.32	0.98
8	20/06/02	0.80	0.16	0.02	0.98
9	11/02/07	0.96	0	0.03	0.99
10	03/06/07	0.75	0.17	0.04	0.96
11	17/02/15	0.68	0	0.31	0.99
12	23/03/16	0.93	0	0.06	0.99
13	06/02/17	0.85	0	0.13	0.98
14	14/04/18	0.67	0.07	0.26	1
15	17/04/19	0.79	0.08	0.12	0.99
16	04/06/19	0.79	0.17	0.03	0.99
17	26/09/20	0.83	0.08	0.06	0.97
18	17/02/21	0.95	0	0.05	1
19	24/03/22	0.86	0	0.14	1

Примечание: жирным шрифтом выделены наиболее значимые факторные нагрузки

Таким образом, исходя из общей физической интерпретации каналов съемки, где общая яркость всех каналов отражает биомассу, БИК чувствителен к содержанию хлорофилла и, соответственно, активности фотосинтеза, а КИК 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.

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 съемки, либо имеют сезонную составляющую и долю описания варьирования больше 1.

При интеграции компонент общей яркости всех каналов (Таблица 2) получено, что первый частный инвариант описывает 67% варьирования первой компоненты всех сроков съемки и положительно связан практически со всеми сроками максимальными коэффициентами детерминации (КД). Таким образом, для компонент общей яркости выделяется один частный инвариант, описывающий интегральную яркость всех каналов съемки фактически за все сроки, высокими значениями выделяющий территории с низкой наземной биомассой, и, соответственно, низкими – с высокой.

Интеграция компонент БИК для бесснежных сроков съемки показала (Таблица 2), что первый частный инвариант описывает 41% варьирования интенсивности фотосинтеза за все сроки, положительно определяется максимальными КД для снимков весенне-осеннего периода и отрицательно – для летних снимков. Второй частный инвариант описывает 23% общего варьирования и имеет положительные КД со всеми сроками съемки. Таким образом, для компонент БИК выделяется частный сезонный инвариант, определяющий положительными значениями высокую интенсивность вегетации, в первую очередь, в начале апреля и низкую летом и наоборот, отрицательными – высокую интенсивность вегетации летом и низкую в начале апреля, а также частный инвариант, положительно определяемый компонентами БИК канала за все сроки съемки. Совместно они описывают 64% общего варьирования БИК за все сроки съемки.

При интеграции компонент КИК за все сроки съемки первый частный инвариант описывает 29% варьирования при значимых положительных КД практически со всеми сроками съемки (Таблица 2). Второй частный инвариант описывает 15% варьирования и максимально положительно связан с летними, а также бесснежными сроками съемки и

отрицательно со всеми остальными сроками. Третий частный инвариант описывает 11% варьирования и имеет максимальные положительные связи со снимками первой-второй декады апреля. Таким образом, он отражает уникальные условия, характеризующие начало вегетации при очень высоком влагосодержании большинства территорий в результате снеготаяния. В результате, три частных инварианта КИК описывают 55% их исходного варьирования за все сроки съемки.

Таблица 2 Результаты интеграции компонент за все сроки наблюдения

Дата (дд/мм/гг)	Интеграции компоненты общей яркости каналов	Интеграции компоненты ближнего ИК канала		Интеграция компоненты коротковолновых ИК каналов		
	Частный инвариант (КД)	Частный сезонный инвариант (КД)	Частный инвариант (КД)	Частный инвариант (КД)	Частный сезонный инвариант (КД)	Частный инвариант первой-второй декады апреля (КД)
04/02/87	0.83338			0.520613	-0.122915	-0.318505
06/06/88	0.76779	-0.535859	0.558682	0.333116	0.637648	0.041285
03/05/90	0.75210	0.282146	0.586703	0.582115	0.419630	0.024473
27/04/00	0.80826	0.409405	0.579390	0.506982	0.437316	0.161197
27/09/00	0.86436	0.711403	0.390996	0.446577	0.298440	0.108856
22/03/01	0.89288			0.568539	-0.311051	-0.188139
10/04/02	0.38077	0.811353	0.304654	-0.057494	-0.457748	0.704343
20/06/02	0.82572	-0.669391	0.577144	0.278043	0.453793	0.190542
11/02/07	0.92588			0.694392	-0.327500	-0.143224
03/06/07	0.84626	-0.753309	0.457787	0.397401	0.449149	0.139908
17/02/15	0.91723			0.857079	-0.278321	-0.089286
23/03/16	0.92830			0.818790	-0.157741	-0.182876
06/02/17	0.90709			0.831144	-0.243879	-0.121053
14/04/18	0.68339	0.797207	0.238260	-0.003864	-0.393397	0.789880
17/04/19	0.84035	0.845519	0.225776	0.288102	-0.301763	0.665482
04/06/19	0.80442	-0.669977	0.513461	0.433405	0.534643	0.243097
26/09/20	0.80018	0.110937	0.591795	0.418258	0.433313	0.450820
17/02/21	0.84226			0.548845	-0.220755	-0.109029
24/03/22	0.81234			0.694933	-0.446638	0.071862
Описанное варьирование	12.80322	4.525929	2.502002	5.547042	2.828772	2.151703
Доля описания	0.67385	0.411448	0.227455	0.291950	0.148883	0.113248

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 БИК, 3) инвариант БИК, 4) инвариант КИК, 5) сезонный инвариант КИК и 6) инвариант КИК первой-второй декады апреля.

Общие инварианты получены при интеграции 6 частных инвариантов методом главных компонент (Таблица 3).

Таблица 3 Результаты интеграции частных инвариантов

Частные инварианты	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 высокими положительными значениями выделяет территории с высоким отражением, сильно обводнённые летом, при их относительно низком обводнении зимой и высокой интенсивностью вегетации, низкими отрицательными значениями – территории с низким отражением и слабо обводнённые летом, при их относительно сильном обводнении зимой и низкой интенсивностью вегетации. Второй общий инвариант высокими положительными значениями выделяет слабо обводненные территории с высокой интенсивностью вегетации летом и низкой в начале апреля и наоборот, низкими отрицательными – сильно обводненные территории с низкой интенсивностью вегетации летом и высокой в начале апреля. Третий общий инвариант 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.

Параметры порядка рельефа были получены при обобщении 90 морфометрических характеристик рельефа (по 10 характеристик, реализуемых в программе ENVI, для 9 иерархических уровней с линейными размерами 30 м, 150 м, 270 м, 450 м, 1050 м, 1290 м,

1650 м, 2430 м, 3810 м). В результате было выделено 12 параметров порядка рельефа, которые описывают более 70% варьирования всех переменных рельефа (Таблица 4).

Таблица 4 Морфометрические характеристики рельефа, определяющие параметры порядка

	отрицательно	положительно
1	Лапласиан (90-1050 м)	
2	Минимальная, продольная и профильная кривизны (1650 м)	Лапласиан (150 м)
3		Уклоны
4	Освещенность с юга	Освещенность с востока
5	Лапласиан, максимальная, продольная и профильная кривизны (450 м)	Лапласиан и минимальная кривизна (3810 м)
6	Освещенность с востока и юга	
7	Плановая кривизна (1705-2430 м)	Кривизна поперечного сечения (1705-2430 м)
8		Лапласиан и максимальная кривизна (3810 м)
9	Освещенность с востока (150-450 м)	
10	Освещенность с Ю (150-450 м)	
11	Освещенность с юга (150-270м)	Освещённость с востока (1705-2430 м)
12	Кривизна поперечного сечения, продольная и профильная (3810 м)	Плановая кривизна (3810 м)

Интеграция инвариантов отражения и параметров порядка рельефа позволяет выделить 3 основных ландшафтных инварианта и три, дописывающих нелинейные отношения (рис. 3).

Первый 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. Им противопоставляются верховые болота и заболоченные ельники – переувлажненность в течение всего года, активность фотосинтеза преимущественно только весной и низкие значения крутизны. Шестой инвариант дополняет первый за счет выделения обрывистого правого берега реки Тудовка с разреженной растительностью.

Второй ландшафтный инвариант 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 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 экспозиций. Пятый инвариант дописывает второй, высокими значениями выделяет долины речной сети, приуроченные к грядам, и вогнутые части гряд.

Третий ландшафтный инвариант высокими значениями 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. Низкими значениями выделяются вершины гряд и верховые болота, для которых характерен активный фотосинтез, высокое влагосодержание, маленькая биомасса. Четвертый инвариант дополняет третий, на нем высокими значениями выделяются верховые болотные массивы и склоны гряд, при этом речные долины на озерно-водноледниковой равнине выделяются низкими значениями.

Таблица 5 Факторные нагрузки инвариантов отражения и наиболее значимых параметров порядка рельефа с ландшафтными инвариантами

		Ландшафтные инварианты					
		1	2	3	4	5	6
Инварианты отражения, параметры порядка рельефа	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	-0.20	0.00
	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	0.00
	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		0.10	0.08	0.08	0.06	0.05	0.03

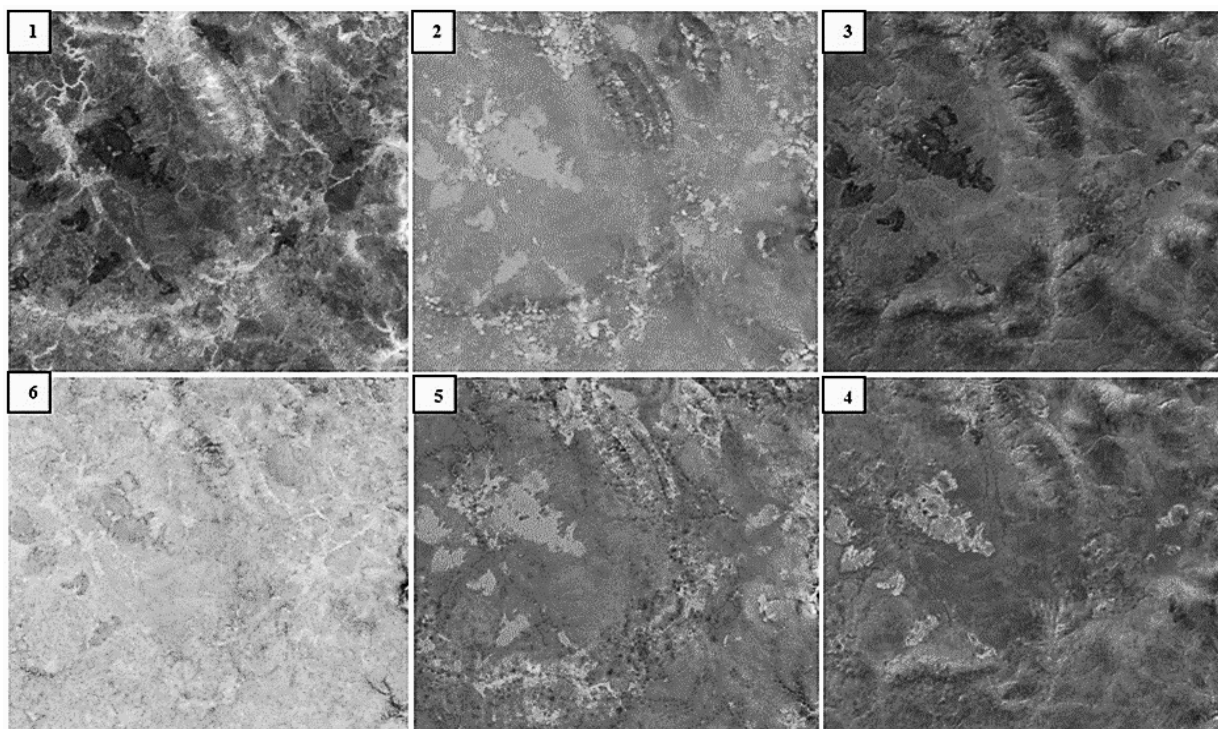


Рисунок 3 Ландшафтные инварианты

Верификация ландшафтных инвариантов проводилась на основе полевых материалов, полученных за 30 лет. Результаты мультирегрессионного анализа показали тесную связь между ландшафтными инвариантами и характеристиками растительности, в первую очередь наземного яруса, и почвы (Таблица 6). Таким образом, можно сделать вывод о достоверности полученных результатов, а, следовательно, ландшафтные инварианты могут быть использованы в качестве основы для классификации территории с целью получения автоматизированной ландшафтной инвариантной карты.

Таблица 6 Верификация по полевым данным

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

Карта пространственно-временных инвариантных состояний ландшафта

На основе ландшафтных инвариантов выполнена дихотомическая классификация 6 уровня (максимум 64 класса). Малые классы, приуроченных к зарастающим с/х землям, залежам и лугам и занимающие менее 0,1% территории исследования, были объединены с ближайшими классами. Таким образом, был получен 41 класс (Рисунок 4), которые условно можно разделить на несколько блоков: 1 - 8 класс – вторичные хвойно-мелколиственные леса, 9 -15 класс – верховые болота, 16 - 29 класс – мелколиственно-хвойные и хвойные леса, 30 – 39 класс – вторичные мелколиственные леса, 39 – 41 класс – луга, сенокосы, селитебные земли.

Оценка качества классификации проводилась на основе дискриминантного анализа. Было показано, что классы распознаются дистанционными данными на 31,3%, характеристиками рельефа – на 26,5%, а совместно – на 67,5%, что почти на 10% больше, чем их сумма. (Таблица 8). Данные теплового канала слабо описывают классы на 21,9%, а их совместное использование с другими внутренними и внешними данными даже ухудшает распознавание классов. При дискриминантном анализе классов от характеристик полевых описаний наибольший вклад в разделение классов дают характеристики растительности – 43% (наземного яруса - 34,3%, древостоя – 16,6%), а характеристики почв и отложений верно определяют принадлежность к классу в 23,9 % случаев. Итак, верное распознавание

классов от всех источников данных составило более 85%, что демонстрирует высокое качество выполненной классификации.

На основе полевых данных и морфометрических характеристик рельефа была составлена легенда к выделенным классам, отражающая состояние растительности, почв и позицию в рельефе. Пример описания классов представлен в таблице 7.

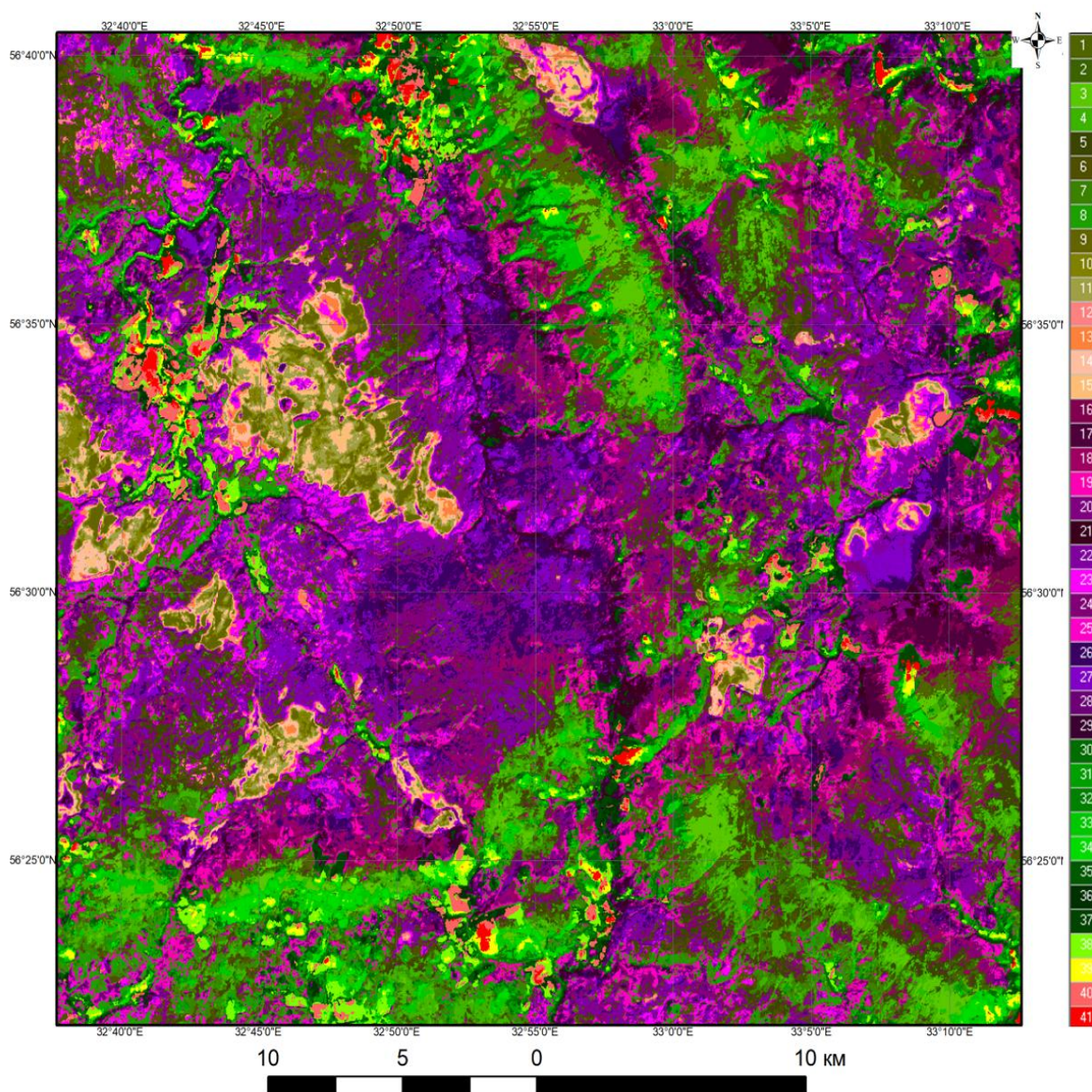


Рисунок 4 Карта инвариантных биофизических состояний ландшафтов, полученная на основе классификация ландшафтных инвариантов (1 - 8 класс – хвойно-мелколиственные, 9 -15 класс – верховые болота, 16 - 29 класс – мелколиственно-хвойные и хвойные леса, 30 – 38 класс – мелколиственные леса, 39 – 41 класс – луга, сенокосы, селитебные земли)

Таблица 7 Примеры описания классов

Вторичные хвойно- мелколиственные леса	Грядово-холмистая преимущественно слабодренированная моренная равнина	
		Возвышенные, относительно выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемыми мореной, под вторичными мелколиственными неморально-бореальными лесами на дерново-слабоподзолистых почвах
Верховые болота	Слабоволнистая замедленно дренированная моренно-водноледниковая равнина	
		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
Мелколиственно-хвойные и хвойные леса	Слабоволнистая неравномерно дренированная моренно-водноледниковая равнина	
		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
	Слабоволнистая заболоченная моренно-озерно-водноледниковая равнина	
		Относительно пониженные, плоские поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и озерно-водноледниковыми суглинками и песками, под сосновыми бореально-влажнотравными, заболоченными лесами на торфяных почвах со средней мощностью 1,5 м
Мелколиственные леса	Грядово-холмистая преимущественно слабодренированная моренно-(водноледниковая) равнина	
		Относительно пониженные, слабовогнутые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной, под мелколиственными (сероольшанники, ивняки) бореально-богатовлажнотравными лесами на дерновых и дерново-слабоподзолистых почвах
Луга		Средневысотные, выпуклые поверхности, сложенные покровными суглинками, подстилаемые мореной и водноледниковыми суглинками и песками, под богатовлажнотравными лугами на агродерновой почве (пашни, пастбища, сенокосы, молодые вырубки)

Таблица 8 Результаты пошагового дискриминантного анализа

Пошаговый дискриминантный анализ классов от	Доля (%) верно определённых точек
<i>внутренних данных</i>	
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)
<i>внешних данных</i>	
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)
<i>внешних и внутренних данных</i>	
Всех переменных без ДИ	85.7 (1317)

Заключение

В отечественной ландшафтной школе на протяжении длительного периода времени понятие инвариант имело статическую трактовку, под ним понималась некая вертикальная или горизонтальная структура ландшафта, обусловленная геоморфологической основой. По мере развития представлений о ландшафте как о сложной динамической системе и накопления мультиспектральной дистанционной информации, понятие «инвариант» стало возможным отождествить с параметром порядка системы, имеющим вполне определенный физический смысл.

С развитием методов дистанционного зондирования возрос интерес к построению интегрального обобщающего изображения, которое характеризует всю временную серию сцен на определенную территорию.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показал, что существуют некоторое множество методов обобщения дистанционной информации, однако большинство из них не имеет физического смысла, например, расчет инварианта как среднее арифметическое. Ю.Г. Пузаченко и его коллегами показано, что инварианты динамической системы тождественны параметрам порядка в синергетике, а основным методом для их расчета – метод главных компонент.

В условиях южно-таежного ландшафта 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 фотосинтетического процесса, 3. яркость коротковолновых инфракрасных каналов, связанная с содержанием свободной воды. При этом, прослеживается сезонная динамика по соотношению второго и третьего компонентов, в летний бесснежный период ведущее значение имеет яркость в ближнем ИК, в то время как в период снеготаяния (вторая декада апреля) – яркость коротковолновых ИК.

Обобщение компонент за все сроки наблюдения позволяет получить 6 частных инвариантов: 1 яркости всех каналов (биомассы), 2 ближнего инфракрасного (фотосинтеза) и 3 коротковолновых инфракрасных каналов (влажности) за 35 лет наблюдений.

Применение метода главных компонент относительно частных инвариантов показало, что они не являются ортогональными, взаимонезависимыми, в отличие от компонент для каждого срока наблюдения. В результате получено 3 общих инварианта отражения. Первый общий инвариант положительно связан с количеством биомассы, активностью протекания фотосинтеза в течении всего года и отрицательно - с сезонным варьированием содержания свободной влаги в ландшафте. Второй общий инвариант положительно связан с влажностью в течении всего года и отрицательно с сезонным протеканием фотосинтеза. Третий общий инвариант в наибольшей степени определяется влагосодержанием в период снеготаяния, а также активностью протекания фотосинтеза для всего года. 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 течении всего года, второй – с продуктивностью в вегетационный период и третий – с продуктивностью в весенне-осенний период (Sandler'skiy, 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 дополнительных, доописывающих нелинейные отношения) были получены путем интеграции 3 инвариантов мультиспектральных данных Landsat и 12 параметров порядка рельефа

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.

Проведенные исследования позволили прийти к следующим выводам:

- 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.
- 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.
- 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%).
- 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 характеристиками полевых описаний.
- 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 последовательного обобщения основных каналов сцен Landsat, дающая основу, наряду с параметрами порядка рельефа, к получению карты инвариантных состояний ландшафтов, охватывающих относительно длительный промежуток времени.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины / Ю. Г. Пузаченко, **А. С. Байбар**, А. В. Варлагин и др. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2019. — № № 2. — С. 51–68.
2. 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.
3. Пузаченко М. Ю., **Байбар А. С.**, Пузаченко Ю. Г. Отображение свойств лесных почв южной тайги Центрально-Лесного заповедника в дистанционных гиперспектральных измерениях // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. — 2023. — № 8. — С. 129–142.
4. Теоретико-методологическое обоснование границ и целостности в ландшафтном покрове и его компонентах / А. Н. Кренке, Р. Б. Сандлерский, **А. С. Байбар** и др. // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. — 2023. — № 7. — С. 93–108.