

На правах рукописи



Фахретдинов Артур Венерович

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ МЕРЗЛОТНЫХ
ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

1.6.21 – Геоэкология

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
географических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре Тюменском научном центре Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Московченко Дмитрий Валерьевич, доктор географических наук.

Официальные оппоненты:

Каверин Дмитрий Александрович, доктор географических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник (г. Сыктывкар).

Санников Павел Юрьевич, кандидат географических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), кафедра биогеоценологии и охраны природы, доцент (г. Пермь).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (г. Барнаул).

Защита состоится 18 сентября 2025 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета «24.2.358.04» при ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ) <http://www.psu.ru>.

Автореферат разослан « 14 » _____ июля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук,
доцент



Поморцева Анна Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Глобальное потепление климата является одной из главнейших экологических проблем современности. Наиболее сильно климатические изменения проявляются в полярных и приполярных районах (IPCC, 2021). На севере Западной Сибири рост температуры воздуха и количества атмосферных осадков приводит к изменению растительного покрова и таянию мерзлоты (Walker et al., 2009; Romanovsky et al., 2010; Васильев и др., 2020). Изменение флористического состава и структуры сообществ, рост фитомассы изменяют геоэкологические условия и устойчивость многолетнемерзлых пород, так как существует взаимосвязь растительности с температурой грунтов и глубиной сезонного протаивания (Epstein et al., 2013; Moskalenko, 2013).

В последние два десятилетия доступность баз данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обусловила появление большого числа исследований, нацеленных на определение современной динамики растительного покрова полярных и приполярных территорий. Одним из наиболее часто применяемых подходов является пространственно-временной анализ изменения растительности по значениям вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Однако оценка трендов NDVI, выполненная разными авторами на севере Западной Сибири, неоднозначна. Ранее проведенные исследования показывают, что тренды NDVI различаются в зависимости от сроков наблюдений и структуры растительного покрова анализируемой территории. Реакция фитоценозов по-разному проявляется даже в пределах одного типа растительности (Esau et al., 2019). Данные различия свидетельствуют о сложности отклика фитобиоты на климатические изменения. Кроме этого, возникает необходимость определения доли антропогенного фактора в изменчивости растительного покрова в связи с интенсивным освоением нефтегазовых месторождений северных территорий (Корниенко, Якубсон, 2011). Это также требует привлечения вегетационных индексов (NDVI, SWVI), которые хорошо отражают особенности накопления наземной зелёной фитомассы по сравнению с прилегающими ненарушенными участками (Лавриненко, 2018).

Особенно актуальна задача определения современных трендов изменения растительности и геоэкологических условий в южной криолитозоне (зона островного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (ММП)). ММП вблизи южной границы распространения подвержены климатогенным изменениям. Здесь в настоящее время сокращается площадь распространения ММП и происходит опускание их кровли (Васильев и др., 2020).

Большая часть мерзлых грунтов в южной криолитозоне приурочена к торфяным массивам и отдельным буграм пучения (Smith, Riseborough, 2002). Считается, что вечная мерзлота под торфяниками будет оттаивать под влиянием прогнозируемого потепления, что может привести к изменению

свойств экосистем и процессов развития ландшафта (Tarnocai, 2009). Усугубляет природные риски техногенная деятельность, которая усиливает процессы таяния ММП (Дубровин и др., 2019).

Для прогноза динамики мерзлотных ландшафтов в южной криолитозоне Западной Сибири необходимо решение ряда задач. Во-первых, проведение инвентаризационных исследований по выявлению мёрзлых торфяников, определению их площади и особенностей распространения в южной криолитозоне. Во-вторых, установление современных тенденций изменения растительности, от которых во многом зависит глубина сезонного протаивания и температура пород. В-третьих, привлечение разнообразной климатической информации, позволяющей объективно прогнозировать изменения. В решении этих задач большую роль может сыграть применение данных дистанционного зондирования.

Степень разработанности проблемы. Современная динамика геосистем приполярных районов активно исследуется множеством российских и зарубежных ученых. Одним из объектов, привлекающих наибольший интерес, являются мёрзлые торфяники, широко распространенные в тундре, лесотундре и северной тайге Западной Сибири. Южная мерзлота (массивно-островного и островного распространения) в Западной Сибири развита преимущественно в бугристых торфяниках (Шполянская и др., 2022), которые отличаются высокими темпами увеличения температуры мерзлоты под влиянием климатических колебаний и техногенных нарушений (Москаленко, 2009, 2012). В результате этого происходит деградация торфяных бугров, активизация криогенных процессов, в особенности при изменениях фитоценозов (Шишконокова и др., 2016; Губарьков и др., 2022). Удаление растительного покрова на торфяниках при хозяйственном освоении ведёт к оттаиванию ММП, а восстановление происходит при вторичном заболачивании (Опекунова и др., 2018). Повышает актуальность исследования мёрзлых торфяников их роль в глобальном цикле углерода. Торфяные болота, выполняющие функцию хранилища углерода, при разрушении их структуры в результате таяния мерзлоты усиливают выброс парниковых газов, что говорит о важности данного типа природных комплексов в глобальной экосистеме Земли (Sim et al., 2021; Kirpotin et al., 2021). В связи с этим, в настоящее время для оценки температурного режима грунтов и изменений мощности деятельного слоя на отдельных участках мёрзлых торфяников севера Западной Сибири проводятся комплексные геокриологические наблюдения (Гончарова и др., 2015; 2017; Бобрик и др., 2015; Matyshak et al., 2017). Однако эти исследования охватывают небольшие по площади территории.

Отмечено, что заметное изменение структуры растительного покрова, его флористического состава на севере Западной Сибири происходит в связи с ростом температуры воздуха (Epstein et al., 2013; Beck, et al., 2011). Подчеркивается влияние трансформации растительного покрова на деградацию многолетнемёрзлых пород (Moskalenko, 2013; Гончарова и др., 2015). Выявлено, что в северотаёжной подзоне наибольшее увеличение температуры

ММП характерно для крупнобугристых торфяников (Москаленко, 2009). Отмечается влияние современного потепления на морфологию, гидрологию и биогеохимию мёрзлых торфяников (Olefeldt et al., 2021). Прогнозируется таяние вечной мерзлоты в течение следующих нескольких десятилетий в зоне островного распространения ММП (Chasmer, Hopkinson, 2017).

Динамика растительных сообществ северных регионов России изучается по данным дистанционного зондирования с применением вегетационных индексов NDVI и LAI (Московченко и др., 2017; Зуев и др., 2019; Miles et al., 2019; Shabanov et al., 2021). Большая часть подобных научных работ посвящена определению степени трансформации растительного покрова арктической зоны (Елсаков, 2017; Walker et al., 2009; Goetz et al., 2011; Heijmans et al., 2022). Однако исследователями уделяется недостаточно внимания изучению спектральных характеристик фитоценозов и их влиянию на геоэкологические показатели в субарктической зоне, где мерзлота в торфяниках находится в состоянии, близком к критическому.

Цель исследования: оценить устойчивость мёрзлых торфяников в пределах островной и прерывистой зон распространения многолетнемёрзлых пород севера Западной Сибири в условиях современных изменений климата и техногенного воздействия.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Выявить тренды теплового режима грунтов в различных мерзлотных зонах, используя данные наземного геоэкологического мониторинга и дистанционного зондирования Земли (тепловых каналов спутниковых изображений, дающих информацию о температуре поверхности);

2. Определить пространственные и временные тенденции в развитии доминирующих растительных сообществ южной криолитозоны по результатам вычисленных вегетационных индексов NDVI и LAI и установить зависимость геоэкологических характеристик мёрзлых торфяников от структуры растительного покрова;

3. Дать количественную оценку степени техногенной нарушенности растительного покрова и его климатогенных изменений;

4. Дать прогноз изменения растительного покрова и ключевых геоэкологических параметров мёрзлых торфяников в разных ландшафтах.

Объект исследования: мёрзлые бугристые торфяные болота в зонах прерывистого, островного и редкоостровного распространения ММП.

Предмет исследования: климатогенная и антропогенная динамика температурного режима грунтов и растительных сообществ в южной криолитозоне Западной Сибири.

Научная новизна. Впервые для субарктической зоны Западной Сибири изучена взаимосвязь изменений фитомассы растительности мёрзлых торфяников и температурного режима их поверхности по данным спутниковых тепловых каналов. На основе управляемой классификации мультиспектральных спутниковых снимков Landsat определены отличительные спектральные характеристики мёрзлых торфяников, проведено их картографирование и

оценено пространственное распределение в различных частях южной криолитозоны. Выявлены тенденции изменения температурного режима мёрзлых торфяных болот в разных биоклиматических зонах севера Западной Сибири. Впервые для региона методами геоинформационного анализа по данным климатических характеристик и индексов, рассчитанных по спектральным значениям температуры поверхности Земли, определены климатические маркеры геокриологических границ, нашедшие выражение на картах масштаба 1:15 000 000. Проведено сравнение скорости восстановления растительного покрова мёрзлых торфяников под влиянием различных типов антропогенных нарушений. Составлен прогноз изменения ММП под торфяниками на ближайшие 30 лет на основе мультирегрессионного анализа с использованием спектральных и климатических предикторов.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость состоит в том, что полученные результаты, основанные на использовании данных дистанционного зондирования, расширяют возможности анализа взаимосвязи наземных покровов с геокриологическими условиями и могут способствовать более полному пониманию роли глобального потепления в трансформации природных комплексов южной криолитозоны. Данные спектральных индексов (NDVI, LAI, LST) и геоинформационное автоматизированное определение границ природных и антропогенных комплексов могут быть использованы при картографировании и моделировании климатогенной и техногенной динамики ландшафтов северных территорий на локальном и региональном уровнях. Использование климатических маркеров и индексов геокриологических границ представляет интерес для прогнозной оценки климатической устойчивости ММП.

Практическая значимость заключается в прогнозировании состояния слабоустойчивых криогенных природных комплексов северных регионов для выработки оптимальных методов строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Кроме этого, выявленные тренды динамики фотосинтетически активной биомассы и температуры поверхностного слоя почв мёрзлых болот могут быть учтены при организации экологически ориентированного традиционного природопользования, т.к. данные природные комплексы используются коренным населением в качестве оленьих пастбищ, площади которых сокращаются из-за усиления процессов деградации растительного покрова и протаивания мёрзлых грунтов. Совместное использование индекса нарушенности DI и вегетационных индексов NDVI, SWVI имеет практическую ценность для оценки степени техногенной нагрузки в условиях криолитозоны и проведении мониторинговых мероприятий, направленных на выявление скорости восстановления растительного покрова при промышленном освоении и выработке мер по снижению негативных последствий хозяйственной деятельности.

Методическая основа исследования. В работе использовались традиционные методы географических исследований: описательный,

картографический, сравнительно-географический, методы дистанционного зондирования, ГИС-технологий. Выбор участков исследования производился согласно ландшафтному принципу. Для выполнения поставленных задач был использован ряд традиционных и новейших методов сбора и обработки данных. Описание растительности и почв ключевых участков осуществлялось при помощи комплекса полевых наземных методов исследований. В рамках сравнительно-географического метода выявлялись различия и сходства в современной климатогенной динамике растительного покрова и температурного режима торфяников, расположенных в разных биоклиматических зонах. Методы дистанционного зондирования Земли применялись для получения количественных спектральных характеристик исследуемых природных комплексов, использованных затем при дешифрировании и классификации ландшафтов на ключевых участках, а также для выявления информации о температуре земной поверхности (Land Surface Temperature – LST). В основу исследования был положен геоинформационный метод в сочетании с картографическим, что позволило провести пространственно-временной анализ состояния наиболее чувствительных компонентов криогенных ландшафтов (растительный покров и ММП) севера Западной Сибири и визуально отобразить их пространственную дифференциацию по определяющим параметрам. Для обработки, систематизации, обобщения собранных количественных данных и выявления взаимосвязей использовались математические и статистические методы исследований.

Достоверность научных положений. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается корректно обработанным массивом анализируемых данных с использованием статистических методов и сопоставлением с результатами других исследований по сходной тематике. Исследование базировалось на обработке и анализе более чем 2000 спутниковых снимков, прошедших этапы радиометрической, атмосферной и геометрической коррекции, 3000 количественных значений климатических и 200 геоэкологических характеристик.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на конференции молодых ученых в рамках финала конкурса на присуждение Именных стипендий РГО (Москва, 2022), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды» (Пермь, 2023), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики» (Тюмень, 2023), XX Большом географическом фестивале (БГФ–2024) (Санкт-Петербург, 2024), II (XVII) Всероссийской научно-практической конференции «Природное и историко-культурное наследие Сибири: прошлое, настоящее, будущее» (Тобольск, 2024), Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием IX Вильямсовские чтения (Москва, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 3 включены в базы Web of Science и Scopus.

Связь работы с научными программами. Материалы диссертации получены и обобщены автором в секторе геоэкологии Института проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FWRZ-2021-0006) и гранта Российского научного фонда «Современная динамика мёрзлых торфяников на южной границе распространения в Западной Сибири» (№ 23-27-00366) в качестве исполнителя.

Личный вклад автора. Диссертационная работа является результатом исследований в период 2018–2024 гг. Автор принимал участие во всех этапах проведенного исследования: постановке проблемы, определении цели и задач, получении материалов в ходе полевых работ, сборе, обработке и анализе данных спутниковых съёмок, климатических и геокриологических данных, создании картографических материалов, обсуждении и обобщении результатов, формулировке выводов.

Благодарности. Автор выражает большую признательность доктору географических наук Московченко Дмитрию Валерьевичу – своему научному руководителю за помощь в проведении исследований, искреннюю поддержку и ценные советы. Автор благодарен кандидатам биологических наук Глазунову В.А и Николаенко С.А. за помощь при проведении полевых исследований и составлении геоботанических описаний.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и содержит 171 страницу компьютерного текста, включает список литературы из 233 наименований, в том числе 95 на иностранных языках, 60 рисунков, 10 таблиц и 5 приложений.

В **первой главе** рассмотрены современные климатические и техногенные факторы, влияющие на температурный режим почв, проанализирована роль растительного покрова в поддержании стабильного состояния ММП, описаны основные дистанционные методы, используемые при оценке изменений состояния мерзлотных ландшафтов.

Во **второй главе** приведено описание природных условий участков исследования, представлена методологическая основа работы и материалы, положенные в ее основу: данные полевых геокриологических и геоботанических наземных наблюдений, задействованные материалы спутниковых съёмок, способы вычисления спектральных индексов и проведения управляемой классификаций космоснимков, методы расчёта индикаторных климатических параметров.

В **третьей главе** дана характеристика температурного режима грунтов мёрзлых торфяников, немёрзлых лесов и болот во взаимосвязи с динамикой основных метеорологических показателей, определено их площадное распространение указанных природных комплексов и отличительные спектральные параметры. На основе геоинформационного анализа показаны пространственно-временные различия температурного режима грунтов

центральной части севера Западной Сибири за последнее десятилетие и установлены климатические маркеры южной границы криолитозоны в регионе.

В четвертой главе отражены особенности современной динамики растительного покрова мёрзлых торфяников под влиянием климатических изменений и техногенного воздействия, определена взаимосвязь растительности с температурным режимом грунтов и глубиной сезонного протаивания.

В пятой главе показаны результаты прогноза изменения геоэкологических параметров мёрзлых торфяников на основе мультирегрессионного анализа и моделирования будущих изменений растительного покрова данных геокомплексов с учетом факторов влияния.

Защищаемые положения и их обоснование

- 1. Температура земной поверхности (LST) в южной криолитозоне Западной Сибири растет быстрее температуры приземного слоя воздуха и в большей степени влияет на увеличение глубины сезонного протаивания в зоне островного распространения многолетнемёрзлых пород (ММП).**

Исследование температурного режима дистанционными методами основывалось на использовании показателя температуры земной поверхности (LST), полученного по данным тепловых каналов спутниковых снимков MODIS – тематический продукт MOD11A2 (пространственное разрешение 1000 м) (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov>). Для изучения были выбраны участки размером 10 × 10 км, в ландшафтной структуре которых значительную долю составляют мёрзлые торфяники. Участки расположены в разных природных зонах: №1–2 в пределах северной тайги (зона островного распространения ММП) и №3–4 в пределах лесотундры (зона прерывистого распространения ММП) (рисунок 1).

Результаты показали, что на всех участках происходит возрастание температуры земной поверхности со статистически значимым увеличением средних значений во второй половине рассматриваемого периода (с 2010 г.) ($p < 0,01$, критерий Стьюдента) и отсутствием значимых различий дисперсий (критерий Фишера) по данным проведенной оценки стационарности временных рядов (SNHT – Standart normal homogeneity test). Согласно значениям линейного тренда теплового индекса SWI_{LST} (сумма среднемесячных значений LST выше 0 °C), на торфяниках наблюдается рост температуры на уровне +0,40 °C/год, что немного превышает значение для лесных геосистем. Тренд SWI_{LST} выше тренда SWI_M (тепловой индекс, рассчитанный по данным о приземной температуре атмосферного воздуха) (на уровне 0,30 °C/год). Для всех природных комплексов по SWI_{LST} наблюдается сильная корреляционная связь между изучаемыми участками ($r \geq 0,86$, при $p < 0,01$), а также при сопоставлении с SWI_M , что указывает на синхронность изменений приземной

температуры атмосферного воздуха в исследуемом регионе. Кроме этого, менее сильная, но достоверная связь выявлена между SWI_{LST} и SWI_{LSTM} (тепловой индекс, рассчитанный по данным о температуре земной поверхности по ближайшей метеостанции) ($r \geq 0,68$, $p < 0,01$), что определяет объективность отражения температурного режима с использованием космоснимков MODIS.

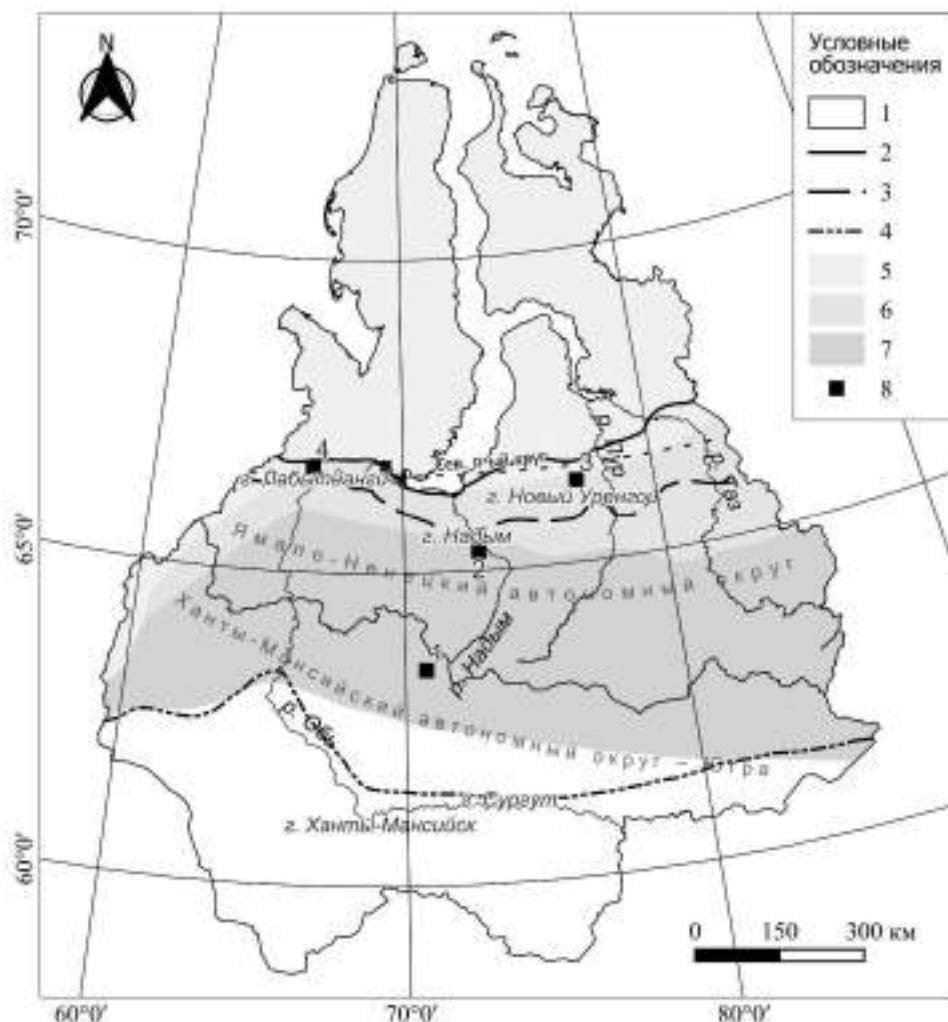


Рисунок 1 – Район исследований. 1 – административно-территориальные границы ЯНАО и ХМАО – Югры; 2–4 границы геоботанических зон и подзон по (Ильина и др., 1985): 2 – лесотундры, 3 – северной тайги, 4 – средней тайги; 5–7 – зоны распространения ММП по (Геокриологическая карта СССР..., 1991): 5 – сплошная, 6 – прерывистая, 7 – островная; 8 – участки исследования: 1 – участок №1 (природный парк «Нумто»), 2 – участок №2 (Надымский стационар), 3 – участок №3 (Южный Уренгой), 4 – участок №4 (Лабытнанги)

Соотнесение значений SWI_{LST} с SWI_{LSTM} выявило различия по ландшафтным зонам – если в северной тайге (участок №2) сумма среднемесячных температур выше 0°C поверхностного горизонта почвы превышает величину по данным спутниковой съёмки, то в лесотундре (участок №4), наоборот, отмечается меньшее значение. Это свидетельствует о лучшем прогревании поверхностных горизонтов почв на более южных участках, что

подтверждается данными по соотношению сумм температур земной поверхности на основе материалов полевых измерений и значений приземной температуры атмосферного воздуха в северной тайге и лесотундре (Гончарова и др., 2015, Каверин и др., 2014). В среднегодовом выражении разница между островной и прерывистой зонами распространения ММП по суммам положительных температур LST мала ($\Delta DDT_{1-2} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$), а определяющими становятся суммы отрицательных температур LST ($\Delta FDD_{1-2} = 548 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$) (рисунок 2).

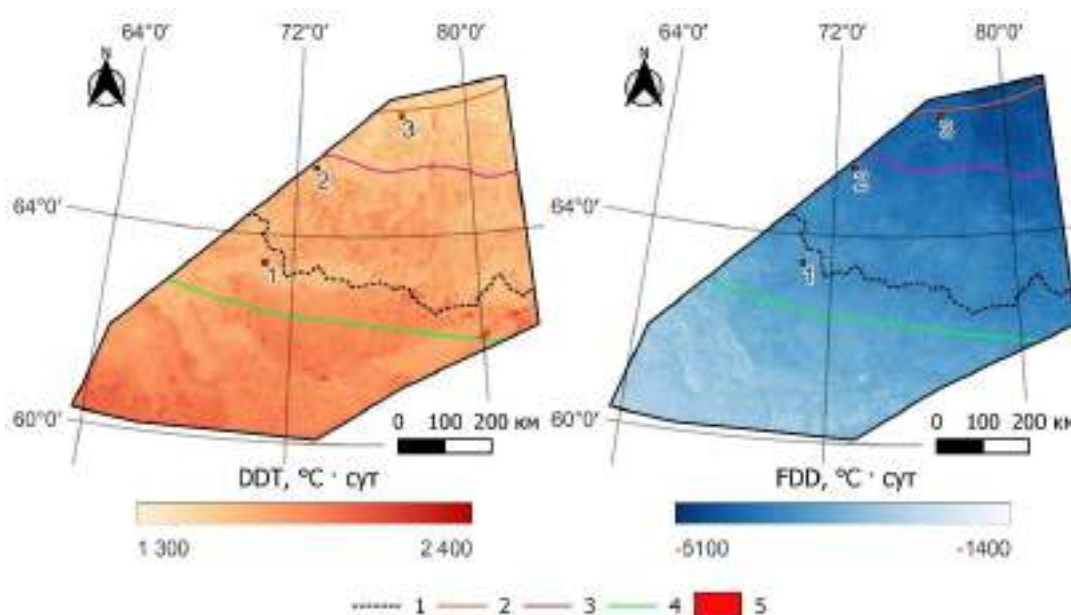


Рисунок 2 – Карты средних значений годовых сумм положительных (DDT) и отрицательных температур (FDD) центральной части севера Западной Сибири за период 2014–2023 гг. 1 – граница субъектов Российской Федерации (ХМАО и ЯНАО); южные границы зон распространения ММП: 2 – сплошной, 3 – прерывистой, 4 – островной; 5 – участки исследования

Возрастание тренда SWI_{LST} коррелирует с увеличением температуры ММП и мощности СТС мёрзлых торфяников, однако влияние данного климатического показателя в малой степени объясняет изменение глубины сезонного протаивания, и чуть лучше выражено для северной тайги ($r^2 = 0,17$), чем для лесотундры ($r^2 = 0,13$) (рисунок 3). Это свидетельствует о большем влиянии на данный геофизиологический показатель других метеопараметров (сумма осадков, мощность снежного покрова) и местных ландшафтных особенностей (растительность, рельеф) в зоне с прерывистым распространением ММП. Согласно множественному регрессионному анализу, более значимым фактором, влияющим на глубину сезонного протаивания на участке №3 (стационар Южный Уренгой), является сумма зимних осадков ($p < 0,10$), чем температурный показатель. На участке №4 (стационар Лабытнанги) наибольший вклад в изменчивость мощности СТС вносит сумма весенних осадков ($r^2 = 0,37$, при $p < 0,10$), являясь главенствующим фактором.

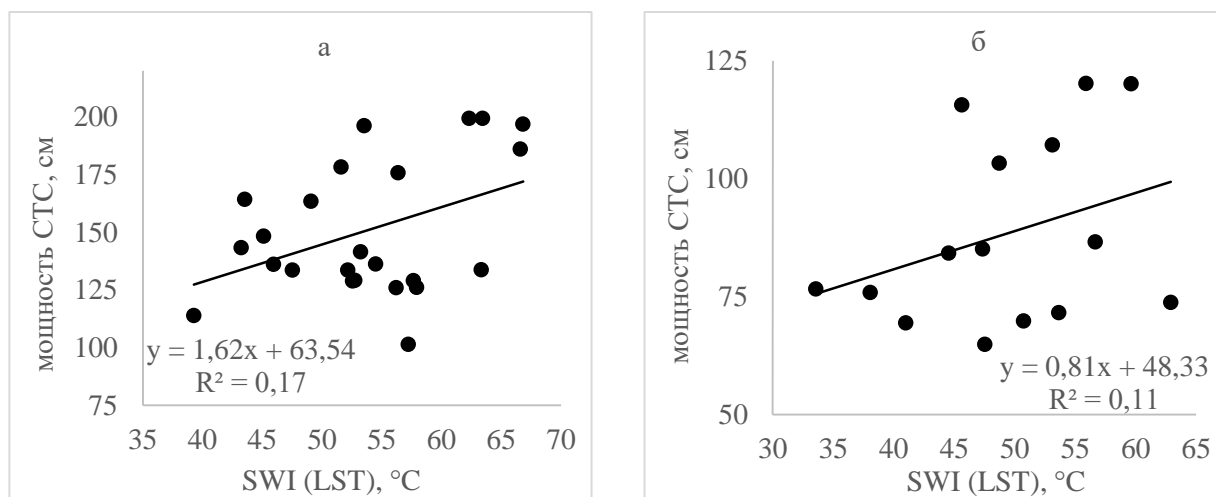


Рисунок 3 – Взаимосвязь мощности CTC мёрзлых торфяников с SWI_{LST} на: а) северотаёжном участке №2 (Надымский стационар) (2000–2023 гг.) и б) лесотундровом участке №3 (стационар Южный Уренгой) (2008–2022 гг.)

2. Климатически обусловленный рост фитомассы наиболее выражен в лесотундре, что является основным фактором стабилизации теплового режима грунтов и обуславливает необходимость сохранения растительности при промышленном освоении.

Рост сумм положительных температур по данным SWI_M и SWI_{LST} способствует возрастанию фотосинтетически активной биомассы и площади листовой поверхности на всех участках исследования, согласно вегетационным индексам (таблица 1). Сравнительно быстрее увеличение накопленной вегетационной активности за год по данным TI-NDVI (сумма средних величин NDVI, превышающих 0,09, рассчитанная по данным спутниковых снимков MODIS MOD13Q1 с разрешением 250 м) происходит на северном пределе таёжной зоны (участок №2), однако более тесная корреляционная связь данного показателя с тепловыми индексами SWI наблюдается в лесотундровой зоне ($r \geq 0,68$, при $p < 0,01$). Здесь же, на самых северных участках, отмечается статистически значимый положительный тренд $NDVI_{max}$ (максимальное значение NDVI за вегетационный период) и LAI_{max} (максимальное значение индекса листовой поверхности (LAI – Leaf Area Index), рассчитанное по данным MOD15A2 с разрешением 500 м).

Таблица 1 – значения трендов вегетационных индексов по участкам исследования за период с 2000 по 2023 гг.

№ участка	$NDVI_{max}$			TI-NDVI			LAI_{max}		
	лес	торфяник	болото	лес	торфяник	болото	лес	торфяник	болото
1	0,003	<i>0,001</i>	0,001	0,032	0,027	0,026	0,013	0,002	0,017
2	<i>0,001</i>	–0,0001	0,0002	<i>0,032</i>	0,025	0,016	0,015	0,011	0,005
3	0,004	0,002	–	0,039	0,021	–	0,025	0,018	–
4	0,002	0,002	0,002	0,042	0,028	0,021	0,041	<i>0,012</i>	–

*курсивом обозначена статистическая значимость при $p < 0,10$, жирным шрифтом с курсивом – при $p < 0,05$, жирным шрифтом – при $p < 0,01$; «–» отсутствие значений, связанное с несоответствием размера пикселей и границ природных комплексов

Сопоставление TI-NDVI с температурой мёрзлых грунтов на глубине от 1,5 до 9 м за период с 2019 г. по 2023 г. на участке №1 (природный парк «Нумто») выявило довольно тесную связь. При тенденции к увеличению фитомассы наблюдался отрицательный тренд температуры грунтов, корреляционная зависимость (r) на глубине годовых нулевых амплитуд (10 м) составила $-0,47$.

Данные по участку №2 показали, что корреляционная связь вегетационного индекса с температурой грунтов мёрзлых торфяников на глубине 0,5 м за период с 2000 г. по 2013 г. ($n = 7$) близка к заметной (с TI-NDVI – $r = 0,52$, при $p < 0,23$, с LAI_{max} – $r = 0,48$, при $p < 0,28$). Более сильная и достоверная зависимость LAI_{max} с температурой грунтов на глубине нулевых амплитуд выявлена для крупнобугристых торфяников за период 2000–2020 гг. ($r = 0,63$, при $p < 0,05$). Данный показатель, вместе с показателем максимальной мощности снежного покрова в наибольшей степени детерминируют изменение среднегодовой температуры ММП ($p < 0,05$). Таким образом, увеличение фитомассы и площади листовой поверхности, связанное преимущественно с разрастанием кустарников, способствует улучшению условий снегозадержания, что является мощным фактором, влияющим на регулирование потоков тепла в грунт. Соотнесение вегетационных индексов с мощностью СТС показало слабую прямую связь с TI-NDVI ($r = 0,41$ при $p < 0,05$); с LAI_{max} ($r = 0,44$, при $p < 0,05$) (рисунок 4), что нетипично для мерзлотных геосистем, т.к. при возрастании фитомассы, как правило, наблюдается уменьшение глубины сезонного протаивания. Это указывает на относительно слабое влияние растительного покрова на глубину сезонного протаивания, что подтверждается более значимым влиянием SWI_m ($p < 0,01$), чем LAI_{max} ($p < 0,10$), согласно множественному регрессионному анализу.

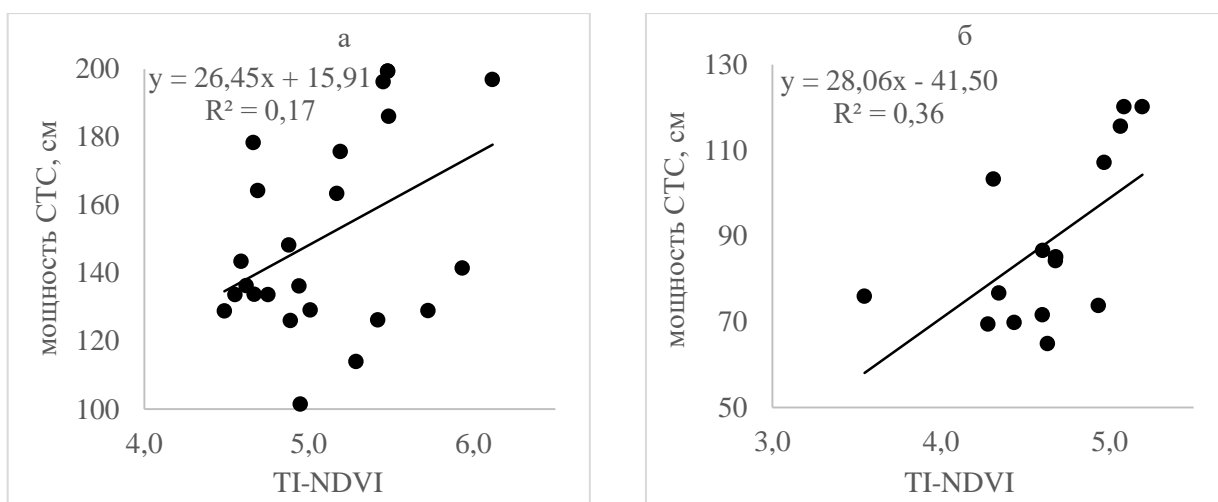


Рисунок 4 – Взаимосвязь мощности СТС мёрзлых торфяников с TI-NDVI на: а) участке №2 за период 2000–2023 гг., б) участке №3 за период 2008–2022 гг.

Необходимо отметить, что теснота связи между TI-NDVI и мощностью СТС усиливается с повышением широты (участок №3 – $r = 0,60$, при $p < 0,05$, участок №4 – $r = 0,59$, при $p < 0,10$) (рисунок 4). Исходя из этого, в зоне с

прерывистым распространением ММП увеличение количества фитомассы способствует сокращению годовых амплитуд температуры мёрзлых грунтов (Васильев и др., 2019), однако не приводит к уменьшению глубины сезонного протаивания. Снегозадерживающая роль растительности, уменьшающая промерзание в холодный период года, является более значимым фактором для теплового режима грунтов, чем уменьшение потока тепла в грунт летом.

Техногенная трансформация фитоценозов способствует ускорению естественных темпов деградации мерзлоты (Павлов, 2008). Выявлено, что после снятия растительного покрова на торфяниках (морошково-багульниково-сфагново-лишайниковая группа растительных ассоциаций) и проявления экзогенных процессов (термокарст, заболачивание) спустя 30 лет на его месте формируется пушицево-сфагновое болото (Москаленко, 2012). Это вызывает понижению кровли ММП на несколько метров и повышение температуры грунтов. Пожары, охватывающие значительные площади севера Западной Сибири, уничтожают растительный покров, снижают альбедо земной поверхности, что также существенно нарушает стабильность мерзлотных условий (Мельников и др., 2010). В связи с этим, учитывая широкое распространение объектов нефтегазодобывающей инфраструктуры в пределах территории исследования, требуются мониторинговые наблюдения за состоянием растительного покрова, в т.ч. с привлечением материалов спутниковых съёмки.

3. Разработка месторождений углеводородов приводит к масштабному нарушению растительности, площадь нарушений достигает 12%, что значительно превышает площадь участков, где смена фитоценозов обусловлена климатическими изменениями.

Пространственно-временные изменения ландшафтов под влиянием хозяйственной деятельности анализировались по состоянию растительного покрова на участках (10 x 10 км) в северотаёжной подзоне Западной Сибири: район размещения Надымской компрессорной станции (КС) №3 (координаты центра: 63° 34' 03,7327" с.ш., 70° 41' 14,0434" в.д.), где техногенное освоение началось с 1970–80-х гг., с неоднократным нарушением и восстановлением фитоценозов (Горбунова и др., 2022) и территория Верхнекалымского лицензионного участка (ЛУ), соседствующая с природным парком «Нумто» (координаты центра: 65° 16' 48,9032" с.ш., 72° 57' 40,3091" в.д.), где отмечено значительное возрастание площади объектов нефтегазодобывающей инфраструктуры с начала 2010-х гг. (Московченко и др., 2020). В ходе полевых работ проведено обследование участков линейно-дорожных, полимагистральных и пирогенных типов нарушений с описанием видов растительности и определением проективного покрытия. В качестве картографической основы и для вычисления спектральных индексов использованы спутниковые данные Landsat 5–8 (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov>).

Геоинформационный анализ показал, что техногенные нарушения и последующие восстановительные сукцессии отчетливо фиксируются по значениям индекса DI (Disturbance Index) (1). С 1991 по 2023 гг. в районе Надымской КС отмечались периодические нарушения, связанные с расчисткой и расширением площадок, новыми вырубками, прокладками газопроводов и ЛЭП. Доля нарушений не превышала 4%.

$$DI = B_r - (G_r - W_r) \quad (1)$$

где B_r , G_r и W_r – компоненты нормализации яркости преобразованного спутникового изображения (Landsat 5–8, пространственное разрешение 30 м) по методу Tasseled Cap (Healey et al., 2005).

По данным вегетационных индексов нарушения идентифицируются хуже, однако позволяют отслеживать изменения, связанные с часто возникающими на данной территории природными пожарами. В особенности отчетливо идентифицируются гари по индексу SWVI (2). На гарях, появившихся в 2000-х гг. на месте сосновых лишайниковых редколесий, в 2013 г. происходило интенсивное самозаращение (+10,8%), которое снизилось к 2023 г. В этот же год отмечено появление новых участков, затронутых пожаром.

$$SWVI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

где NIR и SWIR – значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в ближнем и среднем ИК-диапазонах длин волн, соответственно.

В пределах участка «Нумто» наблюдаются существенные различия в степени нарушенности за последние несколько десятков лет (рисунок 5). К началу 2010-х гг. доля промышленных объектов и дорог по сравнению с 2001 г. выросла на 1–4%, однако к 2023 г., увеличилась до 11–16%, что связано с началом интенсивной разработки месторождений после изменения зонирования Парка в 2016 г., юридически разрешающего в районе исследуемой территории осуществлять недропользование (Московченко и др., 2020). Заметное возрастание значений вегетационных индексов к 2014 г. наблюдалось преимущественно на болотных комплексах и, вероятно, обусловлено улучшением условий произрастания растительности на данном отрезке времени.

По сравнению с Уренгойским месторождением (участок №3), где треть территории подверглась техногенному преобразованию (Корниенко, 2009), на северотаёжных участках «Нумто» и «Надым» уровень техногенного воздействия сравнительно низкий. Доля нарушенных мёрзлых торфяников вблизи Надымской КС не превышает 1%, т.к. большинство инженерных сооружений проложены в пределах лесных геосистем. По данным значений индексов, на участке в природном парке «Нумто» до 2014 г. менее 1% торфяников были подвергнуты антропогенному преобразованию, а с 2014 по 2023 гг. доля нарушенных торфяников увеличилась до 5–12%.

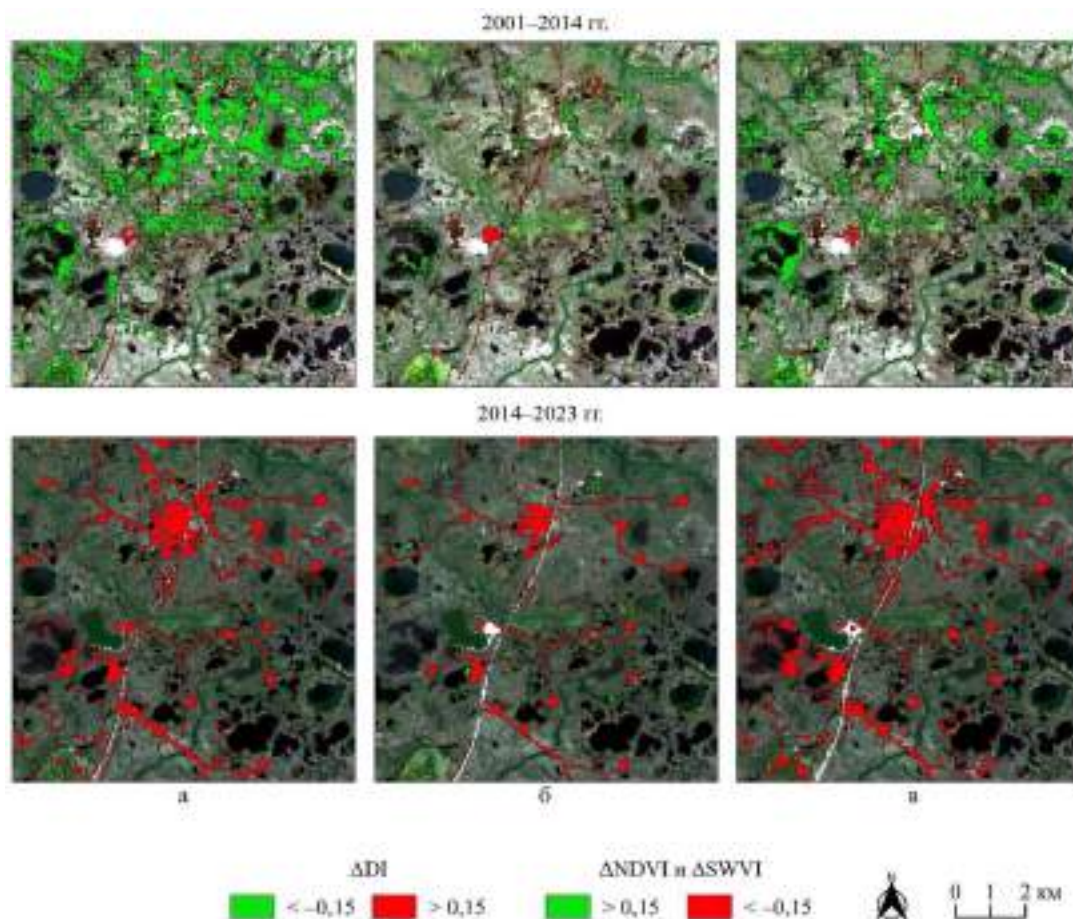


Рисунок 5 – Антропогенные изменения растительного покрова с 2001 г. по 2023 г., выраженные в индексах: а) DI, б) NDVI, в) SWVI

Сравнение площади растительного покрова на мёрзлых торфяниках при различных типах нарушений на территории природного парка «Нумто» выявило, что быстрее самозарастание происходит на горях, чем на промышленных и линейно-дорожных объектах. Так, для соотнесения был выбран участок в северной части Парка (координаты центра: $64^{\circ} 06' 28,0382''$ с.ш., $70^{\circ} 22' 11,4994''$ в.д.), где по снимку Landsat-7 от 2001 г. выявлена свежая гарь на торфянике. К 2014 г. для 94% площади нарушения отмечалась заметная положительная динамика восстановления фитоценозов по значениям NDVI ($> 0,15$) (рисунок 6а-6б). Согласно данным (Сизов и др., 2020; Синюткина, Гашкова, 2022), в первые годы после пожара на торфяных болотах и схожих с ними по растительному покрову мохово-лишайниковых тундрах происходит быстрый рост фитомассы преимущественно за счёт кустарничков и политриховых мхов, что выражается в заметном увеличении значений вегетационного индекса в первые пять лет. Результаты демонстрируют, что спустя 10 лет и более на отдельных участках значения NDVI достигли уровня невыгоревших торфяников, а через 20 лет (2023 г.) практически полностью соответствовали первоначальным величинам. При более сильном преобразовании (снятие напочвенного покрова, создание отсыпок) самозарастание происходит заметно медленнее, что наблюдается на участке с появлением объектов инфраструктуры нефтедобычи (рисунок 6в-6г).

Как отмечается в работе (Соромотин, 2010), этап обустройства месторождения характеризуется наибольшим негативным воздействием на растительный покров в таёжной зоне. Наличие высоких песчаных насыпей среди болотных геосистем с исключительно атмосферным увлажнением существенно снижает скорость сукцессии как в процессе самозарастания, так и при проведении биологической рекультивации (Глазунов, 2013). Поэтому здесь определены малые темпы восстановления растительного покрова за последние 10 лет ($\Delta NDVI \leq 0,15$), а доля заметных изменений составила лишь 12%.

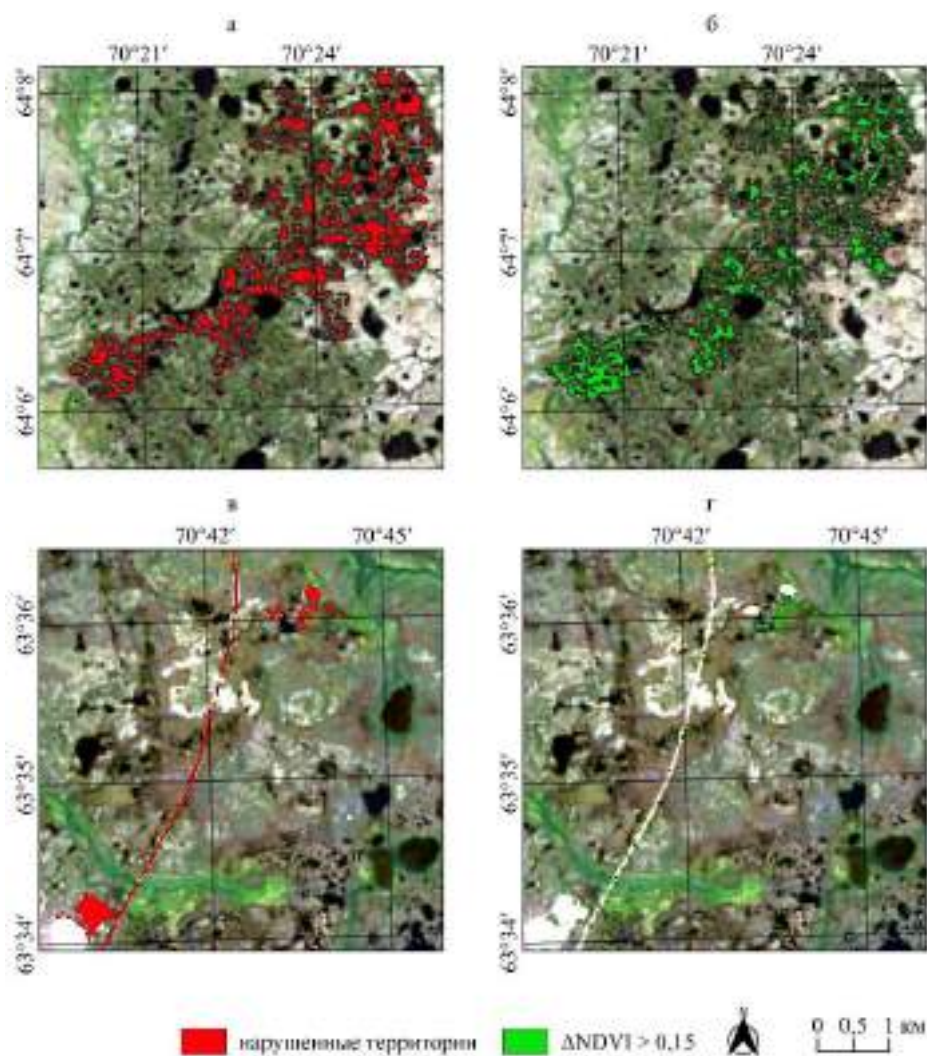


Рисунок 6 – Площадь нарушенных участков и восстановление растительного покрова на них по данным значений NDVI: а) и б) на гари в северной части природного парка «Нумто» с 2001 г. по 2014 г.; в) и г) на территории Парка в пределах Верхнеказымского ЛУ с 2014 по 2023 гг.

Для определения доли климатогенных изменений и нарушений, связанных как с природными, так и с техногенными факторами (пожары), а также прогноза состояния растительного покрова криогенных ландшафтов в районе Надымского стационара был выбран участок со значительно бóльшими размерами (3300 км²), охватывающий междуречье р. Хейгияха и р. Левая Хетта. Моделирование производилось в плагине MOLUSCE 4.0 (Modules for Land Use

Change Simulations) ПК QGIS 3.36. на основе преобразованных по методу Tasseled Cap спутниковых снимков Landsat за разные временные срезы (2001 г., 2013 г. и 2023 г.). Классифицирование при помощи алгоритма “Support Vector Machine” (SVM) показало высокую точность (86–97%) и позволило получить основные типы поверхности (ТП)/классы, формирующие пространственную структуру территории (рисунок 7).

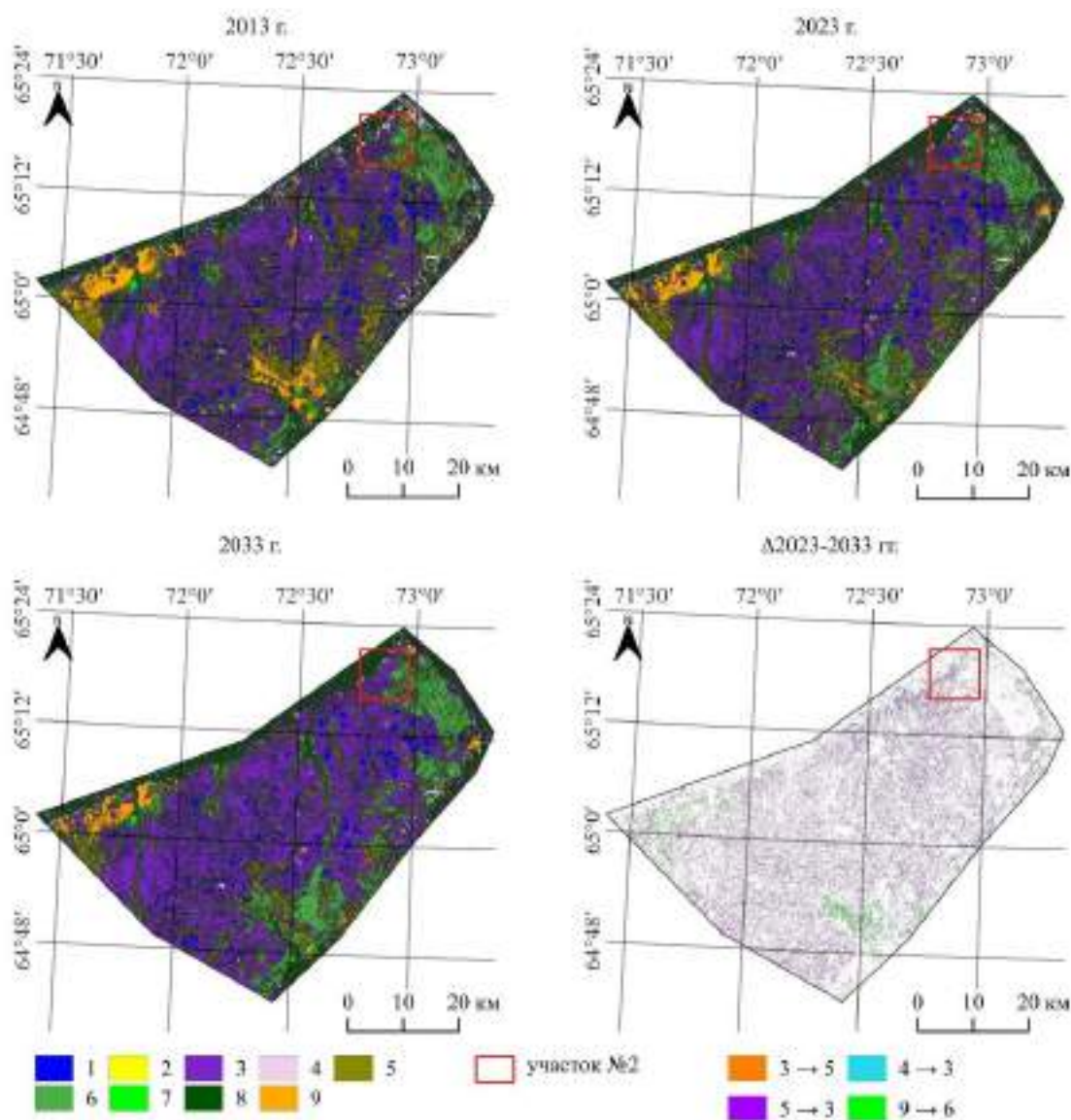


Рисунок 7 – 1 – водные объекты; 2 – пески (раздувы, речные отмели) и техногенные объекты с песчаными насыпями; 3 – крупно- и плоскобугристые травяно-кустарничково-мохово-лишайниковые торфяники; 4 – плоские кустарничково-травяно-моховые болота; 5 – пройденные пожарами участки крупно- и плоскобугристых торфяников с восстанавливающейся растительностью; 6 – кедрово-сосново-лиственничные лишайниково-зеленомошные леса; 7 – редкостойные бѣрезово-лиственничные лишайниковые леса; 8 – пойменные сосново-кедрово-еловые травяно-моховые леса; 9 – пройденные пожарами участки лесов и редколесий с восстанавливающейся растительностью

Для симуляции прогноза предварительно была обучена модель по методу нейронных сетей (Artificial Neural Network (Multi-layer Perceptron), которая характеризуется средней степенью согласованности модели (значение χ «каппа» – 0,60) при использовании карт факторов влияния (уклонов поверхности, рассчитанной по данным цифровой модели рельефа тематического продукта ASTGTM v003 спектрорадиометра ASTER/спутник TERRA (пространственное разрешение 30 м) (<https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/>); кратчайших расстояний до водных объектов, рассчитанной на основе векторных данных OpenStreetMap (источник данных: <https://download.geofabrik.de/russia/ural-fed-district.html>) и вычисленной карты изменений за период 2013–2023 гг.

Анализ площадей ТП за последние 22 года продемонстрировал, что изменения мёрзлых бугристых торфяников не превышают 1% (таблица 2). Несколько более заметная трансформация была характерна для лесных и торфяных гарей ($\Delta S_{2001-2023 \text{ гг.}}$ – 1–3%).

Таблица 2 – изменения площади классов с 2001 г. по 2033 г.

класс	S, %				ΔS , %		
	2001 г.	2013 г.	2023 г.	2033 г.	2001–2013 гг.	2013–2023 гг.	2023–2033 гг.
1	6,31	6,69	5,62	5,49	0,38	–1,07	–0,13
2	0,99	0,99	0,65	0,5	–0,0002	–0,34	–0,15
3	34,5	35,2	35,4	40,8	0,72	0,23	5,39
4	5,59	5,11	3,13	2,29	–0,49	–1,97	–0,84
5	18,7	17,6	20,8	17,2	–1,13	3,23	–3,64
6	16,7	13,9	16,8	18,4	–2,77	2,83	1,66
7	4,69	4,79	5,19	4,62	0,1	0,4	–0,57
8	7,55	8,22	7,6	7,47	0,67	–0,62	–0,14
9	4,99	7,51	4,83	3,26	2,53	–2,68	–1,57

Симуляция модели на 2033 г. продемонстрировала, что в следующие 10 лет наибольшая динамика будет наблюдаться для гарей (рисунок 6). Данные показали, что при отсутствии крупных по площади пожаров в ближайшие годы будет происходить зарастание нарушенных участков торфяников ($\Delta S_{2023-2033 \text{ гг.}}$ – 3,64 %). Согласно исследованиям (Москаленко, 2014), на гарях, отмеченных на торфяниках в 2001 г., спустя 30 лет (к 2033 г.) растительность должна практически восстановиться и приблизиться к прежнему облику, а в структуре заметно возрасти доля лишайников. На более свежих гарях, которые добавились к 2013 г., стадии сукцессии фитоценозов будут отличаться сравнительно меньшей ценотической ролью лишайников при доминировании сфагновых и политриховых мхов.

Согласно прогнозу, вероятно небольшое сокращение площади кустарничково-травяно-моховых болот, отмеченное с 2001 г., и их переход в класс торфяников, согласно матрице переходов, которые выражены максимальным приростом площади ($\Delta S_{2023-2033 \text{ гг.}}$ – 5,39 %). Такой результат подтверждает мнение о продолжающемся процессе заторфовывания на севере Западной Сибири, несмотря на замедление темпов болотообразования в

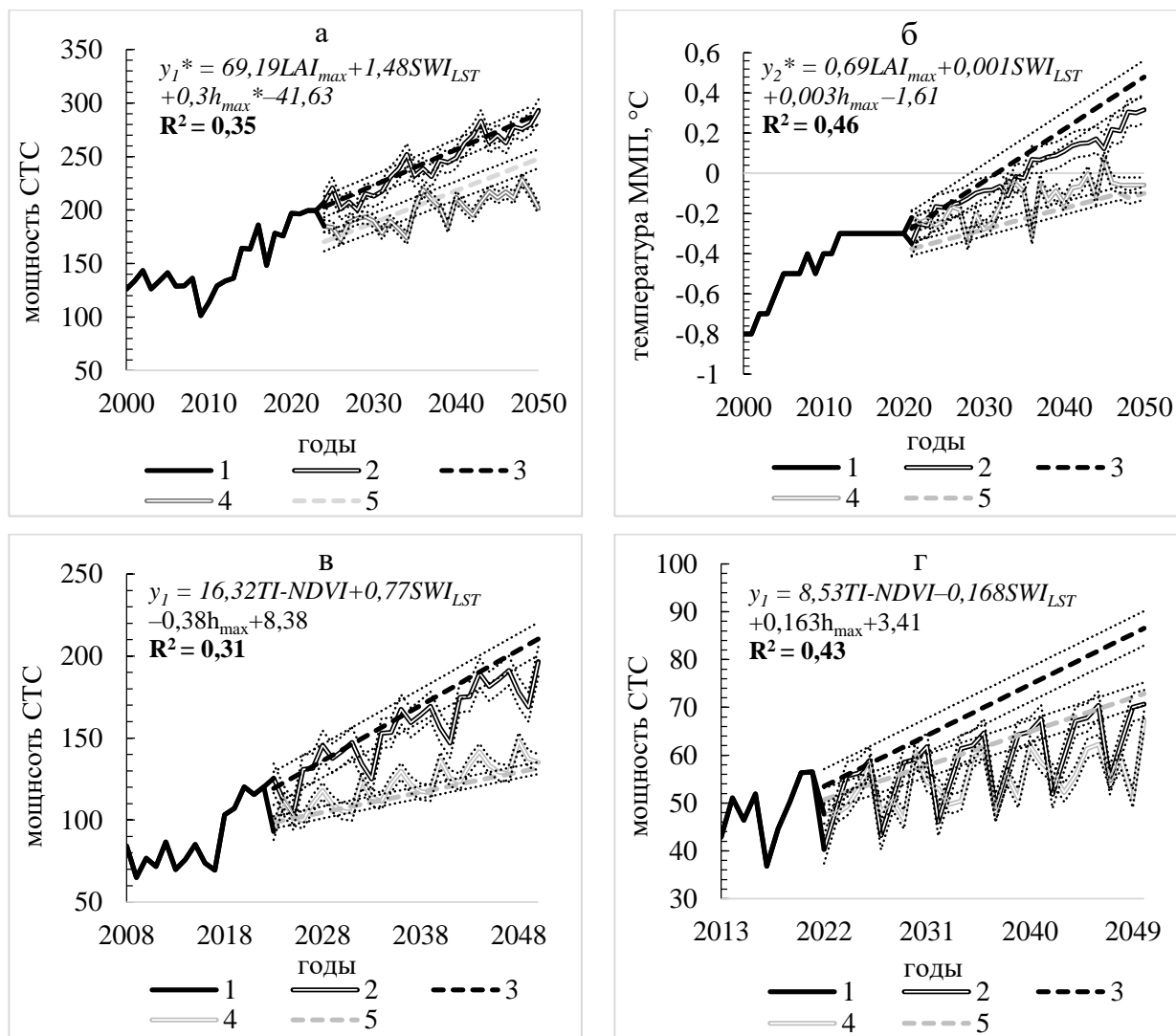
настоящее время (Инишева, Березина, 2013) и о том, что в южной криолитозоне, с потеплением климата происходит небольшое увеличение площади ММП за счёт новообразования на талых участках выпуклобугристых торфяников и осушения части осоково-моховых и топяных болот и перехода их в выпуклобугристые торфяники (Шполянская и др., 2022).

4. В течение ближайших 30 лет рост глубины сезонного протаивания под мёрзлыми торфяниками будет наиболее интенсивным в зоне островного распространения ММП, на глубине годовых нулевых амплитуд температура ММП под крупнобугристыми торфяниками приблизится к точке таяния.

Результаты прогнозной модели показывают, что на северотаёжном участке №2 (Надымский стационар) к середине XXI в., при сохранении текущих трендов климатических параметров глубина сезонного протаивания увеличится до 3 м. Согласно множественной регрессионной модели на основе использования подобранных наиболее значимых предикторов (количество фотосинтетически активной биомассы, температура поверхности земли, максимальная высота снежного покрова), мощность СТС достигнет 2,5 м (рисунок 4а). Температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд по прогнозным данным останется отрицательной со значением $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ к 2050 г. (рисунок 4б). Данные по моделированию согласуются с прогнозом (Павлов, 2008а) об увеличении температуры ММП на глубине 10 м в районе Надымского стационара в течение ближайших 50 лет на величину более $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На лесотундровом участке №3 (стационар Южный Уренгой) прогнозируется заметное увеличение глубины сезонного протаивания, которое к 2050 г. достигнет 2 м. Моделирование на основе привлечения предикторов предсказывает сравнительно низкую величину максимальной мощности СТС к середине XXI в. (132 см и 148 см (при учёте сезонного фактора)) (рисунок 4в). На участке № 4 (стационар Лабытнанги), согласно прогнозу, не ожидается опускание кровли мерзлоты до глубины более 1 м в ближайшие 30 лет (рисунок 4г).

Данные демонстрируют, что с привлечением ландшафтных и климатических предикторов для моделирования будущих изменений геокриологических условий мёрзлых торфяников прогнозируется относительно меньшая степень деградации мерзлоты, чем при использовании простой оценки по данным наблюдений прошлых лет. Сопоставление прогноза на основе множественной регрессии с моделью (Анисимов, Кокорев, 2017) выявило близость их оценочных значений состояния ММП для севера Западной Сибири, согласно которой вероятность увеличения СТС составит 30 ± 14 см. При прогнозируемом росте глубины сезонного протаивания и температуры ММП можно ожидать дальнейшее снижение устойчивости мерзлоты в течение следующих десятилетий, в особенности в районе участков №№2–3.



* y_1 – рассчитываемое прогнозируемое значение максимальной мощности СТС, y_2 – рассчитываемое прогнозируемое значение температуры ММП (крупнобугристый торфяник), h_{max} – максимальная высота снежного покрова за прошедший зимний период

Рисунок 4 – Прогнозируемые значения максимальной мощности СТС а) №2 (Надымский стационар), в) №3 (стационар Южный Уренгой), г) №4 (стационар Лабытнанги); б) температуры ММП крупнобугристых торфяников на участке №2: 1 – фактические данные; прогноз по фактическим данным: 2 – с учётом сезонности, 3 – без учёта сезонности; прогноз, согласно регрессионной модели: 4 – с учётом сезонности, 5 – без учёта сезонности на участках (точечным штрихом показаны границы доверительного интервала для соответствующих прогностических кривых)

Заключение

1. Рост приземной температуры атмосферного воздуха на севере Западной Сибири, наиболее выраженный после 2010–2011 гг., способствует увеличению температуры верхней толщи грунтов. Рост температур грунтовой толщи особенно интенсивен в зоне островного распространения ММП, однако при положительных трендах SWI_{LST} (0,40 °C/год), $LST_{год}$ (0,26 °C/год) в районе геокриологического стационара Южный Уренгой (зона прерывистого распространения ММП) отмечены максимальные значения тренда роста

температуры ММП на глубине нулевых годовых амплитуд ($+0,045$ °C/год) и максимальной глубины сезонного протаивания ($+3,44$ см/год).

2. В южной криолитозоне за последние два десятилетия отмечается тенденция к умеренному увеличению фотосинтетически активной биомассы на мёрзлых торфяниках, при этом тренд $NDVI_{max}$ отчетливее проявляется в лесотундровой зоне ($0,002$ /год). Улучшение температурных условий в корнеобитаемом слое грунтов способствует возрастанию суммарной годовой продуктивности, согласно значениям $TI-NDVI$, что во многом определяется фиксируемым разрастанием кустарников. Данный параметр положительно коррелирует с мощностью СТС и связь становится теснее с увеличением широты. В редкоостровной части криолитозоны (природный парк «Нумто») зависимость температуры ММП плоскобугристых торфяников на глубине 10 м с $TI-NDVI$ отрицательная ($r = -0,47$), что свидетельствует о мерзлостабилизирующей роли растительности.

3. На основе совместного использования индекса нарушенности DI , вегетационных индексов $NDVI$ и $SWVI$ выделены участки, подвергшиеся преобразованию при освоении месторождений углеводородов, проведена оценка интенсивности техногенеза и скорости самовосстановления растительности. Заметные темпы восстановления растительного покрова отмечаются при локальных техногенных воздействиях, обеспечивающих эксплуатацию существующей инфраструктуры (расчистки площадок и трасс), либо дообустройство (новые ветки трубопроводов и ЛЭП, песчаные отсыпки) (район расположения Надымской компрессорной станции). Прирост новых нарушений каждые 10 лет составляет $\approx 4\%$, включая пожары, охватывающие преимущественно приречные лишайниковые сосняки. Доля техногенного влияния на природные комплексы больше доли климатических изменений ($< 1\%$). При этапе обустройства нефтегазовых месторождений (природный парк «Нумто») нарушенность мёрзлых торфяников существенно возросла (до $12\%/10$ лет), а скорость восстановления фитоценозов на них отличается низкими значениями. Быстрее самозаращение происходит на гарях – за 10 лет более 90% территории характеризуется заметным увеличением $NDVI$. На данном этапе освоения техногенный фактор преобразования криогенных ландшафтов превосходит климатогенный на порядок.

4. Разработана прогностическая модель будущих климатогенных изменений геофизиологических условий на основе множественного регрессионного анализа с подобранными наиболее весомыми предикторами (LAI_{max} ($TI-NDVI$), SWI_{LST} , максимальная высота снежного покрова за прошедший зимний период). Показано, что в течение ближайших 30 лет продолжится процесс деградации мерзлоты под торфяниками, особенно заметный в зоне островного распространения ММП. Так, ожидается максимальный рост глубины сезонного протаивания в северотаёжной подзоне (Надымский стационар) ($+49...58$ см), а температура ММП крупнобугристых типов на глубине годовых нулевых амплитуд приблизится к нулю ($-0,1$ °C). Здесь же, в зоне островного распространения ММП, согласно

геоинформационному моделированию, на протяжении ближайших 10 лет ожидается локальное увеличение площади мёрзлых торфяников, что обусловлено восстановлением растительности на гарях и процессами осушения и прироста фитомассы болотных микроландшафтов, способствующих новообразованию ММП.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Тигеев А.А., Московченко Д.В. **Фахретдинов А.В.** Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. С. 166–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177

2. **Фахретдинов А.В.**, Арефьев С.П., Московченко Д.В. Экологическое состояние лиственничников в экотоне лесотундры Западной Сибири (на примере долины р. Монгаюрбей) // Сибирский экологический журнал. 2022. Т. 29, № 4. С. 464–475. DOI: 10.15372/SEJ20220407

Переводная версия

Fakhretdinov A.V., Aref'ev S.P., Moskovchenko D.V. Ecological State of Larch Forests in the Forest-Tundra Ecotone of Western Siberia (As Exemplified by the Mongayurbey River Valley) // Contemporary Problems of Ecology. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 383–392. DOI: 10.1134/s1995425522040035

3. **Фахретдинов А.В.**, Тигеев А.А. Оценка динамики растительного покрова оленьих пастбищ полуострова Ямал при помощи метода полуавтоматической классификации спутниковых снимков // Географический вестник. 2023. № 3(66). С. 106–119. DOI: 10.17072/2079-7877-2023-3-106-119

4. **Фахретдинов А.В.** Современная динамика растительности полярных и приполярных районов Западной Сибири по данным дистанционного зондирования Земли // Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155, № 3–4. – С. 136–144. DOI: 10.31857/S0869607123030059

5. Московченко Д.В., Губарьков А.А., **Фахретдинов А.В.** Температурный режим торфяников Западной Сибири вблизи южной границы распространения многолетнемёрзлых пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 9. С. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

6. Московченко Д.В., **Фахретдинов А.В.** Крупномасштабное картографирование мёрзлых торфяников на юге криолитозоны Западной Сибири // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 175–185. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-1-174-184

Основные статьи и тезисы в материалах конференций:

7. **Фахретдинов А.В.** Проявление современных изменений климата в спектральных характеристиках растительности парка «Нумто» // Современное состояние и перспектива развития сети особо охраняемых природных территорий в промышленно развитых регионах: Материалы II Всероссийской

конференции, посвященной 25-летию природного парка «Нумто»: сборник научных статей, Белоярский, 17 марта 2022 года / отв. ред. Д.В. Московченко; Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа-Югры; ФГБУН ФИЦ «Тюменский научный центр СО РАН»; Бюджетное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа-Югры Природный парк «Нумто». Екатеринбург: Общество с ограниченной ответственностью «Ассорти», 2022. С. 125–130.

8. **Фахретдинов А.В.**, Арефьев С.П., Московченко Д.В. Экологическое состояние экстразонального лиственничника долины Р. Монгаюрбей (Тазовский п-ов) // Связь климатических изменений с изменениями биологического и ландшафтного разнообразия Арктики и Субарктики: Тезисы докладов международного симпозиума, Салехард, 02–03 декабря 2021 года / Отв. редактор А.Ю. Левых, ред. перевода Н.В. Ганжерли. Ишим: филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский государственный университет» в г. Ишиме, 2022. С. 41.

9. **Фахретдинов А.В.**, Тигеев А.А. Использование классификации космоснимков для оценки современных изменений растительного покрова пастбищ Северного оленя (на примере Ямальской тундры) // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, Пермь, 20–21 апреля 2023 года / Под редакцией С.А. Бузмакова. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. С. 512–516.

10. **Фахретдинов А.В.** Использование материалов спутниковой съемки в изучении климатогенной динамики растительного покрова и температурного режима грунтов в ландшафтах островной криолитозоны Западной Сибири // К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Тюмень, 29–30 ноября 2023 года. Тюмень: ТюмГУ-Press, 2023. С. 117–121.

11. **Фахретдинов А.В.** Возможности использования управляемой классификации спутниковых снимков Landsat-8 при определении спектральных особенностей мёрзлых торфяников на севере Западной Сибири // Сборник материалов участников международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках XX Большого географического фестиваля, посвящённого празднованию 300-летия Санкт-Петербургского государственного университета и Российской академии наук. Санкт-Петербург: Свое издательство, 2024 С. 554–558.

12. **Фахретдинов А.В.** Особенности почвенного покрова мёрзлых бугристых болот природного парка «Нумто» (Западная Сибирь) // Сборник трудов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием IX Вильямсовские чтения (27–28 ноября 2024 года) / Под. ред. В.Д. Наумова. М., 2024. С. 283–287.

Структура диссертационной работы

Введение.....	4
Глава 1. Степень изученности криогенных ландшафтов.....	11
1.1. Современное состояние многолетнемёрзлых пород Севера Западной Сибири и причины их деградации.....	11
1.2. Растительный покров как критический компонент криогенных ландшафтов.....	19
1.3. Методы дистанционного зондирования Земли в исследованиях полярных и приполярных геосистем.....	25
Глава 2. Участки исследования, материалы и методы.....	34
2.1. Природные условия участков исследования.....	36
2.1.1. Северная тайга с редкоостровным распространением ММП (участок №1 – природный парк «Нумто»).....	36
2.1.2. Северная тайга с островным распространением ММП (участок №2 – стационар Надым).....	37
2.1.3. Лесотундра с прерывистым распространением ММП (участок №3 – стационар Южный Уренгой).....	39
2.1.4. Лесотундра с прерывистым распространением ММП (участок №4 – стационар Лабытнанги).....	40
2.2. Методы геофизиологических исследований.....	41
2.3. Методы обработки и анализа спутниковых данных.....	43
2.3.1. Методика классификации мультиспектральных спутниковых изображений для определения характеристик криогенных геосистем.....	43
2.3.2. Вегетационные индексы (NDVI и LAI).....	45
2.3.3. LST и климатические индексы.....	47
2.3.4. Индексы антропогенной нагрузки.....	50
2.4. Определение климатических параметров.....	51
2.5. Методы статистической обработки данных.....	51
Глава 3. Анализ температурного режима мёрзлых торфяников, их площадное распространение и спектральные особенности.....	53
3.1. Спектральные и площадные характеристики природных комплексов участков исследования.....	53
3.2. Динамика метеорологических показателей.....	56
3.3. Температурный режим грунтов и мощность СТС.....	63
3.4. Климатические маркеры южных границ геофизиологических зон.....	81
Глава 4. Анализ природных и антропогенных изменений растительного покрова и связь ландшафтной динамики с температурным режимом и геофизиологическими параметрами.....	84
4.1. Пространственная и временная динамика NDVI и LAI.....	84
4.2. Взаимосвязь вегетационных индексов с метеопараметрами, LST, и геофизиологическими параметрами.....	103
4.3. Техногенная нарушенность растительного покрова в районах нефтегазопромысла.....	112
4.3.1. Состояние растительных сообществ при различных типах нарушений.....	112

4.3.2. Оценка нарушенности фитоценозов и динамика их восстановления по данным ДЗЗ.....	113
Глава 5. Прогноз изменений мёрзлых торфяников на севере Западной Сибири	119
5.1. Динамика геоэкологических параметров до 2050 г.	119
5.2. Динамика растительного покрова в зоне островного распространения ММП до 2033 г.	123
Заключение.....	128
Список сокращений.....	131
Библиографический список.....	133
Приложения	156
Приложение 1 Полевые работы	157
Приложение 2 Средние значения спектральных показателей и их стандартные ошибки на участках исследования с 2000 г. по 2023 г.	160
Приложение 3. Площадные характеристики по ТП в районах исследования по результатам управляемой классификации космоснимков Landsat-8.....	164
Приложение 4. Карты участков исследования с различными типами поверхностей, созданные на основе управляемой классификации спутниковых снимков Landsat-8.....	166
Приложение 5. Достоверность выделенных классов/ТП в пределах участков исследования по результатам управляемой классификации космоснимков Landsat-8	170