

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию *Фахретдинова Артура Венеровича*
«*Геоинформационный анализ изменений мерзлотных ландшафтов южной*
криолитозоны Западной Сибири», представленной
на соискание ученой степени кандидата географических наук по
специальности *1.6.21 Геоэкология*

Актуальность темы диссертации. Актуальность в работе прописана четко и обоснованно в ключе современных климатических и ландшафтных изменений в глобальной и региональной криолитозоне. В южной криолитозоне Западной Сибири многолетнемерзлые породы локализованы в пределах криогидроморфных торфяников, где дренированные толщи сезонноталого / сезонномерзлого торфа выполняют роль теплоизолятора летом, тогда как зимой обладают высокой теплопроводностью. Изменения и трансформация растительного покрова, происходящая при климатических изменениях и антропогенных нарушениях, приводят к воздействию на мерзлотную компоненту торфяников, обуславливая протаивание многолетнемерзлых горизонтов. Современные геоинформационные методы исследований ландшафтов криолитозоны позволяют определить дифференцированные во времени и пространстве изменения ландшафтных компонентов, и прежде всего растительного покрова. Торфяники спектрально выделяются на спутниковых изображениях, обладая специфической морфоскульптурой и растительным покровом.

Обширная равнинная криолитозона Западной Сибири в условиях климатического потепления характеризуется протаиванием многолетнемерзлых пород, которое затронуло и такие относительно устойчивые геосистемы как бугристые болота (торфяники). Увеличение температуры воздуха обуславливает повышение температуры торфяных толщ, что обуславливает изменения морфологии, гидрологии и биогеохимии многолетнемерзлых болот. Применение спектральных индексов в геоинформационном анализе арктических ландшафтов в основном направлено на исследования растительного покрова. Однако в диапазоне критических изменений сейчас находятся многолетнемерзлые породы, в XXI веке прогнозируется дальнейшая интенсивная деградация региональной криолитозоны.

Многофакторный анализ климатической, ландшафтной и геокриологической информации позволяет оценить и понять механизмы комплексных изменений субарктических ландшафтов южной криолитозоны Западно-Сибирской равнины. Проведенные исследования имеют высокую значимость с точки зрения биогеохимических циклов углерода. Геоинформационные методы позволяют охватить обширные территории западносибирской криолитозоны, характеризующейся широким разнообразием равнинных (в том числе криогенных) ландшафтов.

Цель исследования сформулирована четко и емко, поставленные диссертантом задачи логически выстроены и взаимосвязаны.

Защищаемые положения. Защищаемые диссертантом положения ясно сформулированы и изложены.

Научная новизна исследования очевидна и неоспорима. В геоинформационной среде сопоставлены и проанализированы разноканальные спутниковые снимки, отражающие информацию о различных компонентах ландшафта: растительности и почвенно-геокриологической обстановки. Оценена

взаимосвязь изменений растительного покрова и температурного режима поверхности почвогрунтов болотных массивов. Выявление специфических спектральных характеристик многолетнемерзлых торфяников позволило качественно выполнить их картирование и оценить особенности пространственной дифференциации. Определение климатических маркеров геокриологических границ является мощным научным инструментом для оценки прогнозных пространственных изменений криогенных ландшафтов на региональном уровне. Площадные антропогенные изменения в регионе наряду с историческими спутниковыми данными позволяет оценить скорость восстановления растительного покрова в субарктических ландшафтах.

Достоверность научных положений и результатов. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается корректно обработанным массивом анализируемых данных с использованием статистических методов и сопоставлением с результатами других исследований по схожей 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 геокриологических характеристик.

Теоретическая и практическая значимость исследования. 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 и геоинформационное автоматизированное определение границ природных и антропогенных геосистем могут быть использованы при картировании и прогнозировании динамики северных ландшафтов в условиях климатических и ландшафтных (в т.ч. антропогенных) изменений. Использование климатических маркеров и индексов геокриологических границ позволят в динамике давать прогнозы и оценивать будущие изменения криолитозоны, определять степень климатической устойчивости многолетней мерзлоты в различных ландшафтах.

Практическая значимость заключается в прогнозировании состояния слабоустойчивых субарктических криогенных ландшафтов при разработке и оптимизации методов строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Динамика фотосинтетически активной биомассы и температуры поверхностного слоя почв многолетнемерзлых болот могут быть учтены при организации традиционного природопользования в интересах коренного населения. Расширенное и комплексное использование спектральных индексов позволяет оценить техногенную нагрузку на ландшафты криолитозоны, данные инструменты могут быть применены в мониторинговых экологических исследованиях, направленных на выявление скорости восстановления почвенно-растительного покрова, при разработке мер по снижению негативных последствий хозяйственной деятельности.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых изданиях из списка ВАК, в том числе в 3 статьях в журналах международных баз Web of Science и Scopus, в 6 публикациях в сборниках материалов конференций. Количество, характер и содержание публикаций не вызывает сомнений и подтверждает уровень исследований кандидата наук.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 171 странице, состоит из введения, обзора литературы, объектов, материалов и методов исследования, результатов исследования и их обсуждения, заключения, библиографического списка, включающего 232 наименования, среди которых 94 – на иностранных языках. Работа включает 10 таблиц, 60 рисунков и 5 приложений.

В первой главе рассматривается степень изученности криогенных ландшафтов. В подглаве 1.1 дан подробный обзор исследований многолетнемерзлых пород Западной Сибири как современных, так и в историческом ракурсе. Приведены основные характеристики многолетнемерзлых пород (ММП) по типу залегания, распространения, температуре, генезису, современному состоянию, условиям формирования с выделением влияющих ландшафтных факторов. В обзоре литературы по исследованиям ММП прослеживается постепенный переход к вопросу влияния современного климата и техногенной нагрузки на криолитозону. Показана уязвимость криолитозоны Севера Западной Сибири в условиях продолжающегося цикла современного потепления. Активная деградация многолетней мерзлоты происходит в центральной полосе регионального тундрово-таежного экотона. Рассматриваются вопросы устойчивости ММП к протаиванию в различных геокриологических и биоклиматических подзонах. Рассмотрены вопросы влияния техногенной и хозяйственной нагрузки на повышение температур ММП.

В подглаве 1.2 рассматривается стабилизирующее влияние растительности на литогенную основу, анализируется дифференцированное влияние различных типов растительности на температуру почвогрунтов. Приводится специфика формирования температурного режима почвогрунтов торфяников. Подчеркивается климатообразующая трансформация растительного покрова, дифференцированно влияющего на температурное состояние ММП. Приводятся примеры агградации многолетней мерзлоты при усилении роста моховой растительности на южном пределе криолитозоны. Смещение границ биоклиматических зон/подзон оказывает значительное влияние на геокриологическую обстановку. Удаление растительного покрова кардинально меняет мерзлотную ситуацию, при этом на южном пределе криолитозоны многолетнемерзлые торфяники могут полностью деградировать. Практически все виды антропогенных воздействий в регионе приводят к протаиванию многолетней мерзлоты.

В подглаве 1.3. рассматривается применение методов дистанционного зондирования при комплексном исследовании арктических и субарктических ландшафтов. Температурное состояние ММП определяется по косвенным ландшафтным факторам, ассоциированным с близким залеганием кровли ММП. Температура поверхности почв в большей степени коррелирует с температурой приземного слоя воздуха, чем почвогрунтов. Раскрыто использование спутниковых снимков в оценке температурного поля поверхности почвенно-растительного покрова криолитозоны. Указано, что нет единого мнения на влияние современного увеличения биомассы кустарниковой растительности на температурное состояние многолетнемерзлых пород.

Во второй главе рассмотрены участки, материалы и методы исследования. Приведено обоснование выбора участков согласно биоклиматической и геокриологической зональности. Исследуемые ландшафты, локализованные в разных природных зонах, находятся в условиях несплошного распространения высокотемпературных ММП. Подробно раскрыты методы обработки и анализа спутниковых данных, приведена математика спектральных и климатических индексов, индексы антропогенной нагрузки. Показано преимущество использования

LST при определении климатических маркеров геоэкологических границ. Климатические характеристики сопоставлялись с вегетационными и тепловыми индексами, равно как и температурой ММП. Приведенные методы статистической обработки подтверждают достоверность полученных результатов.

В третьей главе анализируются спектральные и площадные характеристики ландшафтов многолетнемерзлых болот. Коэффициент спектральной яркости – эффективный критерий выделения многолетнемерзлых торфяников в пестрой мозаике субарктических ландшафтов. При анализе метеорологических показателей отмечены значимые тренды увеличения температуры воздуха и поверхности почв. Рост количества осадков при этом был не столь выражен. За последние десятилетия выявлено постепенное увеличение сумм положительных температур поверхности, рассчитанных по ГИС и метеорологическим характеристикам. Межгодовые колебания температурного режима почвогрунтов торфяников показывают климатические особенности отдельных лет.

Анализ данных подтверждает объективность использования космоснимков при исследованиях температурных режимов почвогрунтов. Наилучшие взаимосвязи наблюдаются между спектральными температурными характеристиками и температурой верхнего слоя почв. Увеличение температуры почвогрунтов согласуется с повышением глубины сезонного протаивания, которое активизировалось в последние десятилетия. Динамика тепловых индексов сопоставляется с таковой температуры почвогрунтов и глубины сезонного протаивания. Суммы положительных температур поверхности, рассчитанные по спектральным характеристикам повышаются сильнее, таковых приземного слоя воздуха, рассчитанных по метеорологическим данным. Возрастание тренда тепловых индексов сопровождается увеличением температуры ММП многолетнемерзлых торфяников, в меньшей степени с изменением в них мощности сезонно-талого слоя.

Климатические индексы эффективно описывают геоэкологическую зональность региона. Анализ климатических маркеров геоэкологических границ показал, что криолитозона Западной Сибири находится в более суровых климатических условиях по сравнению с восточноевропейской Субарктикой.

В главе 4 проведен анализ природных и антропогенных изменений растительного покрова во взаимосвязи с ландшафтной динамикой, температурным режимом и геоэкологическими параметрами. Во разных субарктических ландшафтах отмечается увеличение максимальных и интегральных значений NDVI, при этом в торфяниках они несколько ниже таковых лесных геосистем. Индекс листовой поверхности в большей мере увеличивается в лесных геосистемах, тогда как в торфяниках его повышение менее выражено. К северу по индексам растительного покрова различия между болотными и лесными геосистемами уменьшаются, что связано с разреживанием древесной растительности. Динамика растительных индексов в лесных геосистемах отличается более восходящими трендами, что связано с наступлением лесной растительности в пределах тундрово-таежного экотона.

Рассмотрена взаимосвязь вегетационных индексов с метеопараметрами, LST и геоэкологическими характеристиками. Рост летней температуры воздуха сопоставим с увеличением индекса листовой поверхности, повышение интегрального вегетационного индекса с температурой приземного слоя воздуха. Выявлены корреляционные связи между значениями вегетационного и листового индексов с температурой грунтов мерзлых торфяников. На торфяниках увеличение вегетационного индекса стало сопоставляться с повышением высоты снежного покрова, который в свою очередь обусловлен ростом кустарникового яруса.

Корреляционные взаимосвязи сильно варьируют по месяцам летнего периода, в зависимости от географического положения и ландшафтных особенностей участков.

По всем участкам отмечается заметная зависимость количественного интегрального значения NDVI от индексов летней температуры SWI_M и SWI_{LST} . В обеих биоклиматических зонах средняя температура весеннего периода вносит наиболее существенный вклад в вариацию значений интегрального NDVI, а майские значения становятся определяющими. Увеличение суммарного сезонного показателя продуктивности фитоценозов коррелирует с возрастанием температуры ММП и мощности СТС, обусловленное выраженной положительной динамикой роста температуры приземного слоя воздуха и поверхности, что улучшает условия произрастания растительности. Возрастание фитомассы кустарников способствует снегозадержанию, что приводит к увеличению высоты снежного покрова и росту температуры почвогрунтов.

В подглаве 4.3. рассматривается техногенная нарушенность растительного покрова на участках нефтегазопромысла. Исследованы техногенные нарушения в пределах лесных геосистем, где смена состава растительности определяется характером и объемом антропогенных нарушений. Площадные нарушения почвенно-растительного покрова оценивались с помощью индекса нарушенности, а также растительными индексами. Коротковолновый вегетационный индекс оказался эффективным при оценке динамики изменения площадей гарей, останавливающихся на торфяниках быстрее чем участки линейных нарушений. Низкая доля нарушений торфяников объясняется большей локализацией промышленных объектов в лесных массивах. Однако нарушения в пределах многолетнемерзлых торфяников кардинально меняют их гидрологический режим и, соответственно, мерзлотную обстановку. При разрушении / изменении верхнего слоя почв вместе с растительным покровом восстановление субарктических ландшафтов происходит гораздо медленнее.

В главе 5 рассмотрен прогноз изменений многолетнемерзлых торфяников в регионе. В качестве прогнозных предикторов в модели выбраны вегетационные и спектральные индексы, статистически реагирующие на климатические изменения. Для прогнозирования изменений мощности сезонно-талого слоя и температуры ММП для каждого участка выведено уравнение множественной регрессии. Согласно прогностическим моделям в торфяниках произойдет существенное, но не катастрофичное опускание кровли ММП. Расчеты в модели показали тенденции к возрастанию площади бугристых травяно-кустарничково-мохово-лишайниковых торфяников за счет самовосстановительных сукцессий на гарях и дальнейшему заторфовыванию кустарничково-травяно-моховых болот.

Актуальность темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость представленного диссертационного исследования не вызывают сомнения. Данная работа выполнена на высоком научном и методологическом уровне. Защищаемые положения отвечают цели и задачам данной работы, выводы достоверны и сделаны на основе анализа большого объема полученных данных. Диссертация Фахретдинова А.В. представляет собой самостоятельную, законченную, оригинальную исследовательскую научно-квалификационную работу, написанную хорошим языком. Достоинства работы многочисленны и неоспоримы, хотя есть небольшие замечания и вопросы.

В части терминологии можно выделить местами замечания по названию / характеристикам геоэкологических подзон, многолетнемерзлых пород, сезонно-талого слоя, торфяников, высоты снежного покрова, поверхности почв, ландшафтных

разностей. В работе присутствует незначительное количество стилистических ошибок.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертационная работа «*Геоинформационный анализ изменений мерзлотных ландшафтов южной криолитозоны Западной Сибири*» соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (ред. 25.01.2024), а ее автор, *Фахретдинов Артур Венерович*, заслуживает присуждения ученой степени кандидата *географических наук* по специальности *1.6.21 – Геоэкология*.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник отдела
почвоведения Института биологии Коми
научного центра Уральского отделения
Российской академии наук – обособленного
подразделения Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Федерального исследовательского
центра «Коми научный центр Уральского
отделения Российской академии наук».
(адрес организации: 167982, г. Сыктывкар,
ГСП-2, ул. Коммунистическая, д. 28, ИБ ФИЦ
Коми НЦ УрО РАН, отдел почвоведения;
Тел.: +7(8212)245115,
e-mail: directorat@ib.komisc.ru,
сайт: <https://ib.komisc.ru/rus/>),
доктор географических наук (1.6.12 –
Физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов), без
звания.



Каверин Дмитрий Александрович

Я, Каверин Дмитрий Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных, содержащихся в отзыве, в документы, связанные с защитой указанной диссертации, и их дальнейшую обработку.

07.08.2025

Подпись (и)	<i>В.В. Каверина</i>
заведующий	
Ведущий документооборот Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»	
О.Л. Заболоцкая	
« <i>07 августа</i> » 20 <i>25</i> г.	

