

На правах рукописи



КАВЕРИН Дмитрий Александрович

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ПОЧВ СУБАРКТИКИ
ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЛАНДШАФТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в отделе почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН)

Научный консультант:

Горячкин Сергей Викторович, доктор географических наук, главный научный сотрудник, и.о. заведующего отделом географии и эволюции почв Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института географии РАН.

Официальные оппоненты:

Архангельская Татьяна Александровна, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», профессор кафедры физики и мелиорации почв факультет почвоведения.

Федоров Александр Николаевич, доктор географических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт мерзлотоведения СО РАН», заместитель директора по науке.

Куликов Анатолий Иннокентьевич, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН», главный научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт имени В.В. Докучаева».

Защита состоится «___» _____ 2022 г. в ____ ч. ____ мин. на заседании Диссертационного совета 24.1.049.02 при ФГБУН Институте географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН.

Электронная версия автореферата размещена на интернет-сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>. Текст автореферата и полный текст диссертации размещены на сайте Института географии РАН

<http://www.igras.ru>

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные подписью и печатью, просьба высылать на адрес d00204603@igras.ru

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.049.02,
кандидат географических наук



Е.А. Белоновская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Изменение климата, одна из важнейших международных проблем XXI века (Мохов, 2015), рассматривается как причина возможных угроз безопасности Российской Федерации (Климатическая доктрина, 2009). В Арктике происходят самые большие изменения климата по сравнению с другими регионами Земли (Мохов и др., 2013). За последние сто лет темпы потепления в Арктике (+2,4 °С) были существенно выше таковых для Северного полушария (+1,0 °С). Изменение климата в высоких широтах связано преимущественно с эффектом арктического усиления (Алексеев и др., 2015). При этом меняется вертикальная температурная стратификация атмосферы, приводящая к снижению ее статической устойчивости, усиливается меридиональный теплоперенос и изменяется тепловое излучение поверхности почв (Pithan, Mauritsen, 2014). В результате потепление в большей степени проявляется у поверхности и в тропосфере до 8-16 км (Алексеев, 2014). В три последних десятилетия в Арктике наблюдались максимальные значения приземной температуры воздуха для всего периода метеорологических наблюдений (Мохов, 2015).

Северные регионы Земли играют значительную роль в процессах, воздействующих на окружающую среду в глобальном масштабе, и служат индикаторами глобальных природных изменений, в особенности климатических (Шерстюков, 2008). Европейский северо-восток России является субарктическим регионом, где с 1970-х гг. выросла среднегодовая температура воздуха при многолетнем тренде +0,06 °С/год (Доклад, 2021). В регионе прогнозируется максимальное для европейского субконтинента проявление арктического усиления с повышением среднегодовой температуры воздуха в XXI веке до 2 и более °С (IPCC, 2021).

Потепление, происходящее на фоне изменения атмосферной циркуляции в регионе, обуславливает постепенное изменение географических условий, оказывая непосредственное влияние на разные компоненты геосистем (IPCC, 2021). Увеличение температуры приземного слоя воздуха в регионе способствовало повышению температуры почв и почвообразующих пород (до 0,04 °С/год), что, в свою очередь, привело к протаиванию многолетнемерзлых пород (Малкова, 2010; Biskaborn et al., 2019; Vasiliev et al., 2020). Если климатические факторы определяют основные региональные тренды изменения температуры почв и почвообразующих пород, то многообразие ландшафтных компонентов в геосистемах в значительной мере влияет на выраженность и направление этих трендов (Streletskiy et al., 2014).

Европейский северо-восток России – уникальный регион с обширным тундрово-таежным экотонном, охватывающим несплошную высокотемпературную криолитозону, характеризующийся значительным разнообразием ландшафтов на фоне постепенного нарастания суровости климата к северу. В данных условиях многие компоненты геосистем региона становятся особенно чувствительными к изменению климата и антропогенным воздействиям (Осадчая, Тумель, 2012). Одним из наиболее чувствительных ландшафтных компонентов являются почвы, где основным индикатором становится их режимная компонента, и в особенности температурный режим почв (Streletskiy et al., 2017). Ландшафтное разнообразие региональных субарктических геосистем обуславливает значительную пространственную дифференциацию температурных режимов почв (Мажитова, 2008).

Понимание разнообразия температурных режимов почв, функционирующих в различных ландшафтных и климатических условиях, предполагает их типизацию с применением

существующих классификационных систем. В современной классификации почв России (2004) профильный компонент является основным, в связи с чем актуальным становится развитие режимной составляющей классификации (Герасимова и др., 2020). Наиболее подробная и широко используемая российскими почвоведомы классификация температурных режимов почв рассмотрена в работе В.Н. Димо (1972). Данная система охватывает широкий спектр температурных режимов почв различных природных зон нашей страны. Данная классификация использует температурные показатели на глубине 20 см, оценивая преимущественно влияние климатических условий на температуру почв.

За рубежом для классификации температурных режимов почв широко применяется американская Таксономия почв (*Keys to Soil Taxonomy*, 2014), которая на высоком уровне учитывает температурные характеристики почв на глубине 50 см. Данные с этой глубины использовались и для характеристики латерального распределения температуры в комплексном почвенном покрове (Архангельская, 2012). Анализ температурных характеристик средней части профиля (50 см) позволяет оценить влияние на них как поверхностных, так и внутрипочвенных условий. При распространении в геосистемах многолетнемерзлых пород температурные данные с глубины 50 см более эффективно отражают влияние ландшафтных условий (Мажитова, 2008).

Температурный режим является важнейшей характеристикой почв, определяющей интенсивность происходящих в них физико-химических и биологических процессов (Дьяконов, 1988; Беручашвили, 1990), что существенным образом влияет на циклы углерода (IPCC, 2021). Современные вызовы в физической географии, включая географию почв, обусловлены необходимостью развития исследований в области функционирования компонентов геосистем, в том числе почв, подразумевающую изучение их режимной компоненты. В последние десятилетия исследования функциональных свойств почв способствует ускоренное развитие программной, приборной и методической базы (Красильников, Таргульян, 2019). Внедрение логгерных технологий кардинально расширило возможности изучения почвенных режимов в сравнении со стационарными измерениями. Широкое применение цифровых логгеров внесло революционный вклад в исследования температурных режимов почв, позволив существенно расширить набор задач, решаемых в географии почв. Развитие приборно-методической базы в смежных областях физической географии, в свою очередь, позволило эффективнее анализировать влияние факторов окружающей среды, обуславливающих разнообразие температурных режимов почв (Быховец и др., 2007).

Цель исследований:

Установить закономерности пространственно-временной дифференциации температурных режимов почв, функционирующих в условиях современных климатических изменений и антропогенных воздействий в субарктических геосистемах европейского северо-востока России.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи:**

1. Выявить закономерности пространственной дифференциации температурных режимов и геокриологических условий функционирования почв субарктических геосистем региона во взаимосвязи с климатическими и ландшафтными факторами;
2. Оценить и сопоставить влияние климатических изменений и антропогенных воздействий на температурные режимы и геокриологические условия функционирования почв;

3. Систематизировать полученные массивы данных с определением количественных критериев, эффективно дифференцирующих температурные режимы и мерзлотные характеристики почв, функционирующих в различных ландшафтных и климатических условиях регионального тундрово-таежного экотона;

4. Адаптировать и усовершенствовать комплекс современных методов исследований, позволяющих анализировать влияние климатических и ландшафтных факторов на температурные режимы и геофизиологические условия функционирования почв.

Положения, выносимые на защиту.

1. Значительная заболоченность тундрово-таежного экотона европейского северо-востока России обуславливает широкое распространение экосистемно-защищенных (с мощным торфяным горизонтом) мерзлотных почв, относительно устойчивых к повышению температуры и протаиванию в условиях современного изменения климата.

2. Антропогенные воздействия на субарктические геосистемы приводят к трансформации экосистемной защиты почв, вызывая различные по выраженности и направленности изменения температурных режимов почв, приводящим как к протаиванию, так и формированию многолетнемерзлых горизонтов в почвах и почвообразующих породах.

3. Предложенная температурно-мерзлотная классификационная компонента позволяет эффективно дифференцировать температурные режимы и геофизиологические условия функционирования почв при современных климатических и ландшафтных изменениях в субарктическом регионе, охватывающем тундрово-таежный экотон с высокотемпературной криолитозоной. Выявленное многообразие температурных режимов почв выходит за рамки традиционных классификаций, лишь частично отражающих дифференциацию температурных режимов почв региона.

4. Комплексное применение статистических и геоинформационных моделей позволяет прогнозировать временную и пространственную дифференциацию температуры и глубины сезонного протаивания почв субарктических геосистем при наличии доступных количественных показателей климатических и ландшафтных характеристик.

Научная новизна. Впервые в субарктических ландшафтах северо-востока европейской России проведено комплексное изучение температурных режимов и сопряженных геофизиологических условий функционирования почв. Проанализированы годовые циклы температурных режимов почв и подстилающих пород во взаимосвязи с климатическими и ландшафтными характеристиками. Показан количественный вклад климатических (среднегодовые температуры воздуха, суммы положительных и отрицательных температур воздуха, индекс морозности воздуха) и ландшафтных факторов (мощность поверхностного органогенного горизонта и влажность почв, высота растительного и снежного покрова, рельеф) в пространственно-временную дифференциацию глубины сезонного протаивания почв. Впервые для региона на основе геоинформационного анализа климатических характеристик (среднегодовые температуры воздуха, суммы положительных и отрицательных температур воздуха, годовое количество осадков) и индексов (морозности воздуха, сухости, сухости холодного периода, относительной континентальности климата) определены климатические маркеры географической дифференциации почвенно-геофизиологических границ и температурных режимов почв. Методом множественного регрессионного анализа рассчитаны

региональные пространственные модели, позволяющие прогнозировать температурные режимы почв на основе данных количественных климатических показателей. Выявлена региональная специфика влияния антропогенных изменений ландшафтных компонентов на температурное состояние почв субарктических геосистем при строительстве и эксплуатации сезонных и постоянных дорог, сельскохозяйственном использовании и последующих постагрогенных изменениях. Впервые для европейского Севера России в условиях полевых экспериментов оценено взаимосвязанное влияние климатических и ландшафтных изменений на температурные режимы почв тундровых геосистем криолитозоны. Адаптирован и усовершенствован комплекс методов исследований, позволяющих рассмотреть влияние климатических и ландшафтных факторов, обуславливающих разнообразие температурных режимов и геокриологических условий функционирования почв. Предложены количественные критерии типизации температурных режимов, учитывающие как среднегодовую температуру почв, так и глубину сезонного промерзания и протаивания.

Практическая ценность. Практическое значение результатов работы актуально в рамках реализации задач физической географии: обеспечение научных основ для географического прогноза состояния окружающей среды и оптимизации использования природных ресурсов. Полученные научные результаты позволяют оценивать и прогнозировать температурные режимы и геокриологические условия функционирования почв субарктических геосистем в условиях современных и прогнозных климатических и ландшафтных изменений. Усовершенствованный комплекс методов исследований (полевых, математических, геоинформационных, геофизических) расширяет возможности анализа взаимосвязей между различными компонентами геосистем. Результаты исследований использованы для валидации динамической модели, адаптированной для анализа температурных режимов почвогрунтов (Гидрологический Институт, г. С-Петербург), и глобальной климатической модели NIRNAM (Геофизический Институт Университета Аляски, г. Фэрбэнкс, США). Научные результаты использовались в преподавании учебных дисциплин «География почв с основами почвоведения» (Коми Государственный Педагогический Институт) и «Геохимия окружающей среды» (Сыктывкарский Государственный Университет). Результаты исследований могут быть использованы при создании моделей циклов углерода, а также предприятиями топливно-энергетического, жилищно-коммунального и строительного комплексов, дорожного хозяйства в Республике Коми и Ненецком автономном округе при оценке состояния компонентов окружающей среды на территории различных объектов производственной и социально-бытовой инфраструктуры.

Адаптированы и усовершенствованы методы исследований для анализа влияния климатических и ландшафтных условий на формирование температурных режимов почв. Усовершенствована методика геоинформационного анализа почвенно-растительного покрова субарктических геосистем для определения пространственной дифференциации глубины сезонного протаивания во взаимосвязи с ландшафтными компонентами. Адаптирована методика геоинформационного анализа климатических условий, обуславливающих географическую зональность мерзлотных почв. Для исследований пространственной дифференциации глубин залегания сезонно- и многолетнемерзлых горизонтов обоснованы преимущества комбинирования высоких частот (300 и 900 МГц) при георадиолокационном

зондировании почв и подстилающих пород, предложен экономичный метод ручного бурения мерзлых горизонтов (патент на изобретение № 2673571). При систематизации температурных режимов апробированы количественные критерии, эффективно дифференцирующие температурные режимы и геокрологические условия функционирования почв в регионе.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на международных конференциях по изучению многолетней мерзлоты: NICOP (США, 2008), TICOP (Россия, 2012), EUCOP (Португалия, 2014), ICOP (Германия, 2016), EUCOP 2018 (Франция, 2018), Азиатской конференции по изучению многолетней мерзлоты (Китай, 2006), конференции по итогам Международного Полярного года (Норвегия, 2010), Генеральных Ассамблеях наук о Земле (Австрия, 2007, 2015), Арктическом Научном Саммите (Норвегия, 2009; Корея, 2011; Польша, 2013), 4-й, 5-й и 6-й Международных конференциях по Криопедологии (Россия, 2005, 2009; Польша, 2013), 1-й международной конференции «Климат и Криосфера» (Китай, 2005), Второй Международной конференции молодых ученых (Китай, 2006), Всемирном конгрессе молодых ученых по наукам о Земле (Китай, 2009), Международной конференции по рациональному использованию сельскохозяйственных ресурсов (Индия, 2009), 5-м Международном симпозиуме по цифровой картографии почв (Австралия, 2012), международной конференции «Живая оболочка Земли» (Италия, 2014), международной конференции ISTAS (Франция, 2014), Всероссийских научных конференциях молодых ученых «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 2009-2015), заседаниях ученого совета Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, 2010, 2012, 2016), семинаре «Почвы во времени и пространстве» (Москва, 2018), конференциях по исследованию Криосферы Земли (Пушино, 2017, 2019).

Степень достоверности результатов исследований. Полученные результаты и выводы достоверны, измерения проведены на откалиброванных приборах в полевых условиях. Физико-химические анализы проведены на поверенном оборудовании в аккредитованной (РОСС RU.0001.511257) экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН. В работе использованы классические методы почвоведения и географии почв: профильный, морфологический, сравнительно-географический, метод почвенных ключей, метод почвенно-режимных наблюдений, аэрокосмические методы.

Оценка достоверности результатов основана на анализе полученных в полевых условиях массивов данных и лабораторного материала с использованием статистических методов исследований. Выбор объектов исследований осуществляли по ландшафтному принципу. Отбор и пробоподготовка почвенных и подстилающих горизонтов проводили по ГОСТ Р 58595-2019 и ГОСТ 17644-83 соответственно. Исследования проведены на 46 участках в восьми районах исследований, анализ полученных данных по температуре почв охватывает период с 1982 по 2018 гг. Морфологическое описание и физико-химические анализы приведены для 45 почвенных разрезов. Исследования основываются на более чем 100000 измерений температуры почв, 2000 измерений глубины сезонноталого слоя почв, 10000 количественных значений ландшафтных и 10000 климатических характеристик.

Личный вклад автора в работу. Диссертационная работа является результатом многолетних исследований автора в период 2004-2021 гг. Автор участвовал во всех этапах исследований: постановке проблемы, формулировке цели и задач, планировании и проведении

полевых работ, получении исходных данных, их анализе, обсуждении и обобщении, разработке теоретических положений и усовершенствовании практических методов.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 31 статье (вклад автора 70 %) в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 27 включены в базы Web of Science и Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, выводов, изложена на 380 страницах компьютерного текста, включает список литературы из 482 наименований, в том числе 178 на иностранных языках, 61 рисунок, 27 таблиц и четыре приложения.

Благодарности.

Материалы диссертации получены и обобщены в рамках выполнения плановых тем фундаментальных научно-исследовательских работ отдела почвоведения Института биологии Коми НЦ УрО РАН (№№: 215021140065; АААА-Б18-218012990085-1; АААА-А17-117122290011-5) поддержаны грантами Президиума РАН (№ 12-П-4-1065; 15-15-4-46), отделения биологических наук РАН (№ 12-Т-4-1006), РФФИ (№№ 12-04-31759; 14-05-31111; 18-05-60005; 18-55-11003; 20-34-70005), программами Фонда содействия отечественной науки, международными проектами (CALM – Circumpolar Active Layer Monitoring; TSP – Thermal State of Permafrost; CARBO-North № 036993; CryoN; FiWER; ПРООН/ГЭФ 00059042). Автор являлся научным руководителем и (или) ответственным исполнителем разделов и тем.

Автор признателен своим учителям к.г.н. Г.Г. Мажитовой, д.с-х.н. И.В. Забоевой, д.с-х.н. В.Д. Тонконогову, д.г.н. С.В. Горячкину за помощь, поддержку, консультации и ценные советы при проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. История исследований температурных режимов почв и подстилающих пород во взаимосвязи с климатическими и ландшафтными компонентами

Глава посвящена истории исследований температурных режимов почв и подстилающих пород, функционирующих в условиях естественных геосистем тундры и тайги (Воейков, 1904; Шульгин, 1948; Димо, 1972; Сергеев и др., 2007; Мажитова, 2008; Десяткин и др., 2012). В последние десятилетия возрос интерес к исследованию температурных режимов почв во взаимосвязи с климатическими изменениями (Osterkamp, Romanovsky, 1999; Nelson et al., 2002; Анисимов, Белолуцкая, 2002; Павлов, 2003; Hinzman et al., 2005; Железняк и др., 2006; Романовский, 2006; Оберман, 2006; Васильев, 2008; Дюкарев и др., 2009; Romanovsky et al., 2010; Fedorov et al., 2014; Streletskiy et al., 2015). Показано, что особенности пространственной дифференциации и динамики температурных режимов почв осложняются влиянием ландшафтных факторов (Лысак, 1957; Уфимцева, 1962; Худяков, 1984; Бадмаев и др., 1996; Radke et al., 1993; Куликов, 1997; Горячкин, 2001; Bertoldi et al., 2010; Park et al., 2015). Много работ посвящено изучению температурных режимов почв в антропогенно-нарушенных геосистемах (Brown, 1967; Шульгин, 1972; Груздев, 1984; Кононенко, 1986; Benjamin et al., 1990; Ананьева (Малкова), 1997; Караваева и др., 1998; Renaud et al., 2001; Hinkel et al. 2003; Макарычев, 2007; Арчегова, 2007; Игловский, 2008; Варламов и др., 2010; Москаленко, 2012; Дроздов, Шабуров, 2015; Гребенец, Исаков, 2016; Десяткин, Десяткин, 2017; Shiklomanov et al.,

2017; Федоров, Константинов, 2019). Исследованы аспекты кардинальных изменений температурных режимов почв и почвообразующих пород при естественных процессах дренажа термокарстовых озер (Томирдиаро, 1969; Billings and Peterson, 1980; Какунов, 1980; Шило и др., 1984; Кривошеков, 2000; Mackay and Burn, 2002; Jorgenson and Shur, 2007; Оберман, Шеслер, 2009; Jones et al., 2012; Edwards et al., 2016; Roy-Léveillé and Burn, 2016). Изучение температурных режимов почв в физической географии актуально с позиций исследования теплового баланса геосистем (Дьяконов, 1988; 1991). В теплофизике ландшафтов исследования температурного режима почв проводятся при анализе энергообмена между почвой и атмосферой (Беручашвили, 1990).

В главе представлен подробный обзор исследований динамики глубины сезонного протаивания, связанной с температурой почв криолитозоны (Акимов, Братцев, 1957; Втюрина, 1976; Barry, 1988; Brown et al., 2000; Лейбман, 2001; Москаленко и др., 2001; Hinkel et al., 2001; Nixon et al., 2003; Tarnocai et al., 2004; Федоров-Давыдов и др., 2004; Zamolodchikov et al., 2004; Мельников и др., 2005; Константинов и др., 2006; Streletsky et al., 2008; Melnikov et al., 2008; Nelson et al., 2008; Shiklomanov et al., 2012; Бобрик и др., 2015; Sannel et al., 2016; Vasiliev et al., 2020). Освещены региональные особенности исследований динамики мощности сезонного слоя (СТС) (Бакулин, 1952; Тыртиков, 1966; Шаманова, 1970; Казанцева и др., 1988; Mazhitova et al., 2004; Мажитова, Каверин, 2007; Оберман, Шеслер, 2009; Малкова, 2010; Осадчая, Тумель, 2012).

В главе 1 рассматривается развитие геоинформационных методов при исследовании климатических факторов, обуславливающих формирование температурных режимов почв в криолитозоне (Nelson, Outcalt, 1987; Osterkamp et al., 2009; Sazonova, Romanovsky, 2003; Fick, Gruber, 2012; Анисимов, Шерстюков, 2016; Hijmans, 2017). Проанализировано применение геоинформационных методов при исследовании ландшафтных условий формирования температурных режимов почв Субарктики (Дьяконов и др., 1996; Захарченко, 2009; Christensen et al., 2007; Hartemink, 2008; Boettinger et al., 2010; Graham et al., 2012; Aalto et al., 2013; Елсаков, Кулюгина, 2014; Белоновская и др., 2016; Nyland et al., 2018; Федоров и др., 2019). Широкое применение при исследовании почв Арктики получили георадиолокационные методы исследований (Нерадовский, 2014; Gusmeroli et al., 2015; Cao et al., 2017; Бричева, Крылов, 2014).

Проведен анализ исследований температуры почв, функционирующих в пределах северо-востока европейской России до периода климатического потепления XX века (Братцев, 1937, 1954; Яновский, 1944; Акимов, 1947; 1959; Редозубов, 1948; Тютюнов, 1951, Голубев, 1953. Динамика глубины сезонного протаивания мерзлотных почв подробно анализировалась в работах Ф.Г. Бакулина (1952), А.П. Тыртикова (1966), И.И. Шамановой (1970), Г.Г. Мажитовой (Mazhitova et al., 2004). Региональная специфика температурных режимов почв тундровых и лесных геосистем в конце XX века наиболее подробно рассмотрена в работах А.В. Кононенко (1986) и Г.Г. Мажитовой (2008). Особенности современного температурного состояния многолетнемерзлых пород региона рассмотрены в ряде работ (Оберман, 2007; Оберман, Шеслер 2009; Малкова, 2011). Относительно высокие температуры многолетнемерзлых пород (ММП) и относительно мягкий климат для криогенных почв в регионе объясняют большую динамичность геокриологической обстановки, подтверждаемую как мониторинговыми

данными (Vasiliev et al., 2020), так и математическим моделированием (Stendel et al., 2011). Существенная перестройка геосистем криолитозоны в регионе делает особенно актуальными вопросы исследований температурного состояния почв и подстилающих пород во взаимосвязи с ландшафтными и климатическими факторами (Мажитова, 2008).

В главе 1 рассмотрены проблемы классификационного положения почв субарктических геосистем по критериям температуры (Шульгин, 1967; Димо, 1972; Куликов и др., 1997; Кречетов, Черницова, 2007; Key to Soil Taxonomy, 2014) и глубины залегания кровли ММП (Лупачев и др., 2019; Goryackin et al., 2019; IUSS..., 2014). Наиболее подробно классификация температурных режимов почв рассмотрена в работе В.Н. Димо (1972). В данной классификационной системе выделены: типы температурного режима почв – по направлению температурного градиента в системе «почва – атмосфера»; подтипы – по степени континентальности температурного режима, величине годовых амплитуд температуры почвы; виды – по средней годовой температуре на глубине 20 см. При почвенно-климатическом районировании Алтайского края А.М. Шульгин (1948) взял за основу температуру почвы на глубине 40 см и запасы почвенной влаги. В американской классификации почв (Keys to Soil Taxonomy, 2014) для дифференциации термических режимов почв используются температурные характеристики на глубине 50 см, а также наличие/отсутствие кровли ММП в пределах 2 м от поверхности. При исследовании температурных режимов мерзлотных почв Забайкалья А.И. Куликов с соавторами (Куликов и др., 1997) предложил типологическую систему их дифференциации, где почвы разделяются по трем критериям: по теплосодержанию, соотношению мерзлотного и теплого периодов и глубине прогревания до 10 °С. П.П. Кречетов и О.В. Черницова (2007) предложили классификацию температурных режимов почв на основе соотношений экологически активных температур почв на глубинах от 20 до 320 см.

Различия в глубине залегания кровли ММП в мерзлотных почвах определяются действием как ландшафтных, так и климатических факторов. В связи с этим, необходимо обратить особое внимание на классификационную схему генезиса ММП (Shur, Jorgenson, 2007). Данная классификационная схема применима для различных регионов криолитозоны и в контексте настоящих исследований может быть рассмотрена с точки зрения объяснения существования мерзлотных почв. Классификационная схема выделяет следующие типы ММП: климатически-обусловленные (climate-driven); климатически-обусловленные экосистемно-модифицированные (climate-driven, ecosystem-modified); климатически-обусловленные экосистемно-защищенные (climate-driven, ecosystem-protected); экосистемно-обусловленные (ecosystem-driven); экосистемно-защищенные (ecosystem-protected). Климатически-обусловленные ММП формируются в условиях их сплошного распространения, их существование полностью определяется холодным климатом. Климатически-обусловленные экосистемно-защищенные ММП образовались в условиях относительно холодного климата и могут существовать при его потеплении в условиях экосистемной защиты. Экосистемно-защищенные ММП существуют в виде изолированных массивов в условиях неблагоприятного для сохранения многолетней мерзлоты климата со среднегодовой температурой воздуха (-2...+2 °С). Экосистемно-модифицированные ММП формируются в результате коэволюционирования почвообразования и льдонакопления (Shur, Jorgenson, 2007).

Глава 2. Объекты исследований

В геоструктурном отношении европейский северо-восток России входит в пределы Уральского краевого прогиба и Печорской синеклизы, огибаемой с юго-запада Тиманским кряжем. Наиболее распространенными в регионе являются ледниковые отложения, широко распространены покровные суглинки, водно-ледниковые, древнеаллювиальные и болотные отложения (Атлас..., 2011). Печорская низменность имеет плоский слабо пересеченный рельеф с абсолютными высотами до 200 м. Приуральская увалистая полоса представлена предгорным пенеплом, приподнятом в среднем на 250-350 м над ур. м. с общим уклоном к западу. Тиманский кряж представляет систему сильно эродированных сглаженных возвышенностей, разделенных плоскими понижениями, покрытыми четвертичными отложениями.

Европейский северо-восток России характеризуется умеренно-континентальным, умеренно-холодным климатом, находясь на стыке арктической, атлантико-арктической и атлантико-континентальной климатических областей (Доклад..., 2019). Среднегодовые и зимние температуры воздуха уменьшаются с юго-запада на северо-восток, летние с юга на север (Таблица 1).

Таблица 1 – Климатические характеристики европейского северо-востока России по данным метеостанций за 1960-1990 и 2000-2017 гг.

Природная зона/подзона	Метеостанция	T _{год} , °C	T _I , °C	T _{VII} , °C	СОТ, °C·сут	СПТ, °C·сут	F	P _{CP} , мм
1960-1990гг.								
Типичная тундра	Усть-Кара	-7,7	-22,6	8	3465	654	0,7	-
Южная тундра	Воркута	-6,1	-21,3	13	3175	961	0,65	540
Лесотундра	Хоседа-Хард	-5,1	-21,3	13,5	2980	1098	0,62	454
Крайнесеверная тайга	Петрунь	-4,5	-21,2	14,6	2831	1236	0,6	496
Северная тайга	Ухта	-1	-18,2	16,4	2010	1674	0,52	532
2000-2017 гг.								
Типичная тундра	Усть-Кара	-5,7	-20	9,5	2934	866	0,65	307
Южная тундра	Воркута	-4,5	-19,7	13,5	2743	1167	0,6	551
Лесотундра	Хоседа-Хард	-3,8	-20,4	13,9	2663	1312	0,59	475
Крайне северная тайга	Петрунь	-2,9	-19,6	14,9	2471	1433	0,57	561
Северная тайга	Ухта	0,1	-16,4	16,9	1804	1861	0,5	607

T_{год} – среднегодовая температура воздуха; T_I – средняя температура января; T_{VII} – средняя температура июля; СОТ – сумма отрицательных температур воздуха; СПТ – сумма положительных температур воздуха; F – индекс морозности воздуха; P_{CP} – среднегодовое количество осадков.

Индекс морозности воздуха F, рассчитываемый как $СОТ^{1/2}/(СОТ^{1/2}+СПТ^{1/2})$ (1), возрастает с юго-запада на северо-восток. Среднегодовое количество осадков P_{CP} увеличивается с С-З на Ю-В с 500 до 800 мм. В теплый период года выпадает 60-70 % осадков, в холодный – 30-40 %. Средняя максимальная высота снежного покрова возрастает от побережья (около 44 см) к югу до 60 см в Большеземельской тундре и 78 см в предгорьях Урала (Oberman, 2008). Сравнение многолетних климатических значений за периоды 1960-1990 гг. и 2000-2017 гг. по данным

региональных метеостанций показало повышение среднегодовых температур воздуха на $1,5 \pm 0,3$ °С. Среднемесячные температуры января увеличились на $0,5 \pm 0,1$ °С, июля – на $0,6 \pm 0,6$ °С (Таблица 1). Суммы отрицательных температур воздуха уменьшились на 357 ± 32 °С·сут (°С·суток), положительных – увеличились на 201 ± 14 °С·сут, годовое количество осадков повысилось на 34 ± 12 мм. Индекс морозности воздуха снизился на $0,04 \pm 0,01$, усиление климатических изменений наблюдается с юга на север (Таблица 1).

Европейский северо-восток России характеризуется широким распространением многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью до 200 м (Малкова, 2010; Осадчая, Тумель, 2012). Для типичной тундры характерно сплошное распространение ММП, для южной тундры – преимущественно сплошное или прерывистое, для лесотундры – массивно-островное, для крайнесеверной тайги – редкоостровное распространение. В северной тайге мерзлотные почвы отсутствуют, наблюдается сплошное распространение длительно сезоннопромерзающих почв (Государственная..., 1988; Геокриологическая карта, 1998). Современные климатические изменения способствуют протаиванию ММП в регионе (Оберман, Шеслер, 2009).

Исследования температурного режима, мощности сезонноталого слоя (СТС) и обуславливающих их ландшафтных и климатических факторов проведены в 8 районах, расположенных в различных природных зонах и подзонах: типичной и южной тундре, лесотундре, крайнесеверной и северной тайге (Рисунок 1).

Район исследований представляет собой территорию суммарно 20-30 км² по площади, где локализованы отдельные участки исследований, охватывающие разнообразие ландшафтных компонентов и температурных режимов почв данной территории. Выделенные районы исследований характеризуются спецификой геоморфологического строения, климата, почвенно-растительного покрова, климатических и геокриологических условий. В каждой природной подзоне исследовали как суглинистые и песчано-супесчаные (автоморфные), так и торфяные (гидроморфные) почвы. Изучение мерзлотных почв тундровых геосистем проводилось на участках возвышенных наветренных и пониженных, пологих и слабонаклонных поверхностей. При исследовании сезоннопромерзающих почв тундры сравнивали почвы, формирующиеся под мохово-кустарничковой и крупнокустарничковой растительностью. Особенности температурного режима почв лесных геосистем изучали в соответствии с их зональным положением. Исследования температурного режима, морфологических, физических и физико-химических свойств проводили как для почв, так и подстилающих пород (Каверин и др., 2012). В качестве объектов исследований выбрано 46 почвенных профилей, расположенных в пределах районов исследований (Рисунок 1; Таблица 2).

Для обозначения почвенных профилей использовали цифрово-буквенные индексы. Цифрами обозначены номера районов исследований. Буквенные индексы, максимально близкие к таковым, принятым в классификации почв России (2004), обозначают типы (заглавной буквой) и подтипы (прописной) почв. Дополнительно к буквенным индексам применен верхний апостроф для обозначения антропогенно-нарушенных почв и цифры в верхнем индексе при повторении подтипов почв в одном районе исследований.

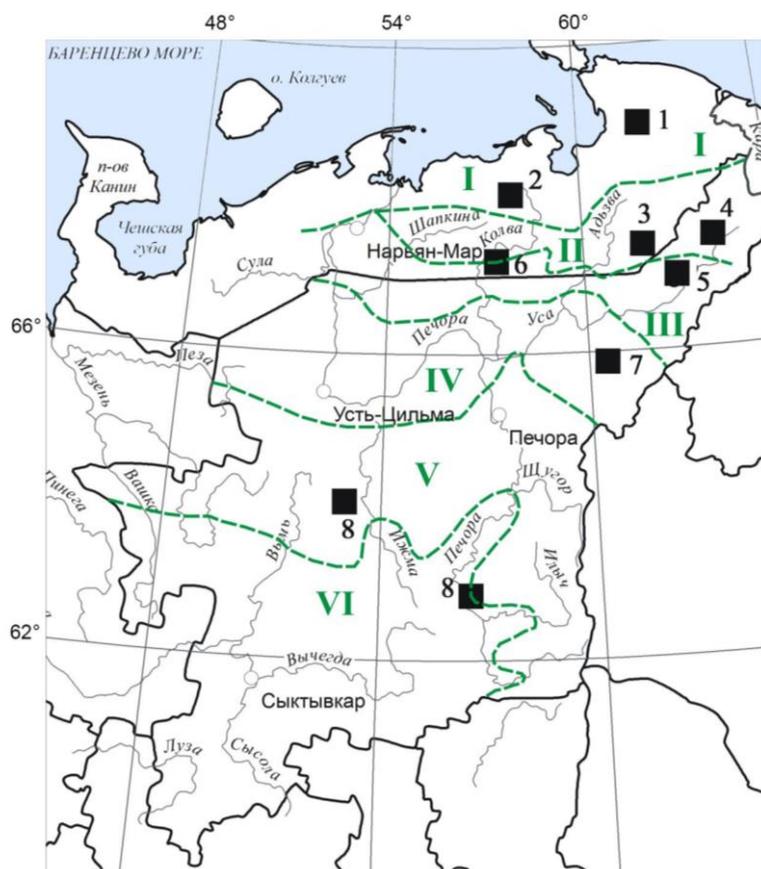


Рисунок 1 – Географическое положение районов исследований: 1. Типичная тундра со сплошным распространением ММП; 2. Типичная тундра с преимущественно сплошным распространением ММП; 3. Южная тундра с преимущественно сплошным распространением ММП; 4. Южная тундра с прерывистым распространением ММП; 5. Лесотундра с прерывистым распространением ММП; 6. Лесотундра с массивно-островным распространением ММП; 7. Крайнесеверная тайга с редкоостровным распространением ММП; 8. Северная тайга со сплошным распространением сезоннопромерзающих почв. Границы природно-биоклиматических зон и подзон показаны зелеными пунктирными линиями: I – типичная тундра; II – южная тундра; III – лесотундра; IV – крайнесеверная тайга; V – северная тайга; VI – средняя тайга. Административные границы регионов показаны черными линиями.

Таблица 2 – Объекты исследований.

Индекс участка	Почва / Район исследований	Классификационная формула*
1. Типичная тундра со сплошным распространением ММП		
1Гп	Торфяно-глеезем перегнойный мерзлотный	-/ММ/МСП
1Гтп	Глеезем перегнойный мерзлотный	-/ММ/МСП
1Гж	Глеезем криогенно-ожелезненный	-/НМ/ПСП
1Гпг	Глеезем потечно-гумусовый	-/ММ/МСП
1Гтм	Торфяно-глеезем мерзлотный	-/ММ/МСП
1Гт	Торфяно-глеезем	-/СМ/МСП
1Гг	Серогумусовая глеевая	-/НМ/ПСП
2. Типичная тундра с преимущественно сплошным распространением ММП		
2Ас	Аллювиальная слоистая	Х/СМ/ССП
2Ас'	Аллювиальная слоистая антропогенно-нарушенная	Х/СМ/ССП
2Аг	Аллювиальная глееватая	УХ/СМ/ПСП
2Аг'	Аллювиальная глееватая антропогенно-нарушенная	УХ/СМ/МСП

2Тм	Торфяная олиготрофная мерзлотная	ОХ/ММ/ПС
2Тм'	Торфяная олиготрофная мерзлотная антропогенно-нарушенная	ОХ/ММ/ПС
2Гк	Глеезем криометаморфический	Х/СМ/ССП
2Гк'	Глеезем криометаморфический антропогенно-нарушенный	Х/СМ/МСП
2Гт	Торфяно-глеезем криометаморфический	УХ/НМ/ПСП
2Гт'	Торфяно-глеезем криометаморфический антропогенно-нарушенный	УХ/НМ/МСП
3. Южная тундра с преимущественно сплошным распространением ММП		
3Ас	Слоистая аллювиальная мерзлотная	Х/СМ/ССП
3Гт	Торфяно-глеезем криогенно-ожелезненный мерзлотный	Х/ММ/БС
3То	Торфяная олиготрофная мерзлотная	УХ/ММ/БС
3Тм	Торфяная олиготрофная мерзлотная	Х/ММ/ПС
3Тс	Торфяная олиготрофная мерзлотная	ОХ/ММ/ПС
3Тп	Торфозем глеевый деструктивный мерзлотный	УХ/ММ/ПС
4. Южная тундра с прерывистым распространением мерзлотных почв		
4Гт	Торфяно-глеезем криотурбированный мерзлотный	УХ/ММ/БС
4Гк	Глеезем криометаморфический	П/НМ/МСП
4Гп'	Агроглеезем криометаморфический потечно-гумусовый	УХ/СМ/ССП
4Гк'	Агроглеезем криометаморфический	УХ/СМ/ССП
5. Лесотундра с прерывистым распространением ММП		
5К	Органо-криометаморфическая оподзоленная глееватая	УХ/СМ/ССП
5Кг	Органо-криометаморфическая	УХ/НМ(3,5 м)/МСП
5Гк	Глеезем криометаморфический	УХ/НМ/ССП
5Тм	Торфяная олиготрофная мерзлотная	ОХ/ММ/БС
5Тп	Торфяная олиготрофная (переходная) мерзлотная	Х/ММ/ПС
5Сг	Светлозем иллювиально-железистый глееватый	УХ/НМ/ПСП
5Си	Светлозем иллювиально-железистый	УХ/НМ/ПСП
6. Лесотундра с массивно-островным распространением ММП		
6Тм	Торфяная олиготрофная мерзлотная	Х/ММ/БС
6Эг'	«Эмбриозем слоистый глеевый»	П/НМ(8 м)/МСП
6Нп'	Насыпные песчаные грунты	УХ/ГМ/ГСП
7. Крайнесеверная тайга с редкоостровным распространением ММП		
7Си	Светлозем иллювиально-железистый	П/НМ/ПСП
7Тм	Торфяная олиготрофная мерзлотная	Х/ММ/БС
7То	Торфяная олиготрофная	П/НМ(9м)/ПСП
7Тм ²	Торфяная олиготрофная мерзлотная	Х/ММ/ПС
7То ²	Торфяная олиготрофная	П/НМ/ПСП
7Тм ³	Торфяная олиготрофная мерзлотная	ОХ/ММ/БС
7То ³	Торфяная олиготрофная переходная остаточно-низинная	П/НМ/ПСП
8. Северная тайга со сплошным распространением сезоннопромерзающих почв		
8Ст	Светлозем иллювиально-железистый текстурно-дифференцированный	П/НМ/ПСП
8Сг	Светлозем иллювиально-железистый поверхностно-глееватый	П/НМ/ПСП

*В соответствии с предлагаемой классификационной температурно-мерзлотной компонентой (см. подглаву 8.2).

2.1. Почвы естественных геосистем

Изучение температурного режима мерзлотных почв южной тундры и лесотундры проводили на семи участках в р-нах исследований 3, 4, 5 с несплошным распространением мерзлотных почв (Рисунок 1; Таблица 2). В качестве объектов исследований выбраны профили 3Гт, 3То, 4Гт, 3Ас, 3Тс, 5Тм, 5Тп, функционирующие в условиях кустарничково-мохово-лишайниковых тундр с глубиной залегания ММП до 1,2 м. Выявление особенностей температурного режима почв бугристых болот на крайнем южном пределе криолитозоны проводили в р-не 7. В качестве объектов исследований выбраны почвы торфяных бугров (7Тм, 7Тм², 7Тм³) и мочажин (7То, 7То², 7То³).

Температурные режимы сезоннопромерзающих почв тундровых геосистем подробно рассмотрели в пределах р-нов 4, 5, расположенных в подзоне прерывистого распространения ММП в южной тундре и лесотундре соответственно (Рисунок 1). В качестве объектов исследований выбраны профили, функционирующие в мохово-кустарничковых (5Гк, 5К) и крупнокустарничковых (4Гк, 5Кг) тундрах. Подробное изучение температурных режимов почв лесных геосистем проводили в р-нах 5, 7, 8, расположенных в лесотундре (5Сг, 5Си), крайнесеверной (7Си) и северной тайге (8Ст, 8Сг) (Рисунок 1).

2.2. Почвы антропогенно-нарушенных геосистем

В работе проводили исследования температурных режимов почв антропогенно-нарушенных геосистем, сформировавшихся под различными антропогенными воздействиями, характерными для региона. В р-не 4 исследовали агроглееземы (4Гп', 4Гк') тундровых постагрогенных геосистем – многолетних сеяных лугов, зарастающих естественной растительностью. В качестве целинных аналогов выбраны глееземы мохово-кустарничковой (4Гт) и крупнокустарничковой (4Гк) тундры. Исследования почв, нарушенных при эксплуатации зимней дороги, проводили в р-не 2, где колея пересекает сообщества мохово-кустарничковых и крупнокустарничковых тундр с глееземами (2Гк), торфяно-глееземами (2Гт), аллювиальными (2Ас, 2Аг) и торфяными мерзлотными почвами (2Тм). На участке бугристого болота, пересекаемого насыпной автодорогой с цементно-бетонным покрытием, проведены исследования температурного режима почв и георадиолокационное зондирование кровли ММП (р-н 6). Исследования проводили на торфяном бугре (6Тм), в придорожном понижении (6Эг) и дорожной насыпи (6Нп'). Динамику температуры почв и подстилающих пород искусственно осушенной в 1979 г. озерной котловины с торфяно-минеральными отложениями исследовали в р-не 3.

2.3. Объекты исследований глубины сезонного протаивания почв

Многолетние исследования мощности СТС проводили на двух мониторинговых площадках, включенных в сеть программы CALM (Циркумпольярный мониторинг мощности сезонноталого слоя) (Brown et al., 2000). Площадка CALM R2 (4Гт) расположена в 13 км к северо-востоку от г. Воркуты, локализована в пределах ландшафта с глеевыми суглинистыми мерзлотными почвами, имеет размер 100×80 м с сеткой пикетов 10×10 м. Слабонаклонная поверхность площадки покрыта мохово-кустарничковой растительностью. Вариабельность мощности СТС бугристых болот исследовали на мониторинговой площадке размером 100×100

м CALM R52 (5Тм). Растительный покров представлен кустарничково-мохово-лишайниковыми сообществами бугров и осоково-сфагновыми – мочажин. Оголенные торфяные пятна диаметром от 4 до 25 м развиты преимущественно на вершинах торфяных бугров. Исследования вариации глубины сезонного протаивания почв во взаимосвязи с ландшафтными компонентами проведены как на мониторинговых площадках, так и в р-нах 1, 2, 4, 5, 6.

2.4. Объекты исследований климатических и ландшафтных условий формирования температурного режима почв

Геоинформационный (ГИС) анализ климатических условий формирования температурного режима почв проведен для всей территории криолитозоны европейского северо-востока России (Каверин и др. 2019). Геоинформационный анализ ландшафтных условий формирования температурного режима почв на региональном уровне проведен для центральной полосы тундрово-таежного экотона, охватывающего среднюю часть бассейна р.Уса, включая р-ны 3, 5 (Пастухов и др., 2016). Геоинформационный анализ почвенно-растительного покрова выполнен в р-нах 1, 7 (Каверин и др., 2016; Пастухов и др., 2016). При статистическом анализе температурных режимов почв использовали данные 23 почвенных профилей (р-ны 3-8).

Глава 3. Методологические подходы и методы исследований

В методологии исследований применяли системный подход. Почвенные профили рассматривали как единые с почвообразующими породами системы, функционирующие в определенных климатических, ландшафтных и геокриологических условиях. При анализе массивов температурных данных использован сравнительно-географический метод в сочетании с исследованием климатических и ландшафтных факторов, морфологических и физико-химических свойств почв. Морфологические описания почв выполняли с учетом ландшафтных и зональных особенностей территории. Таксономические названия почв и индексация генетических горизонтов приведены в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России (2004). Количественный химический анализ почв выполнен в Экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (аттестат РОСС RU.0001.511257 от 16.04.2009). Аналитические работы, отбор и пробоподготовка образцов почв проведены согласно ГОСТ 17.4.4.02.-84. Растительный покров охарактеризован с использованием общепринятых геоботанических методов (Кучеров, Паянская-Гвоздева, 1995).

Комплекс полевых работ сопровождался статистической обработкой полученного материала. На мониторинговых площадках проведены исследования пространственно-временной дифференциации мощности СТС и количественных показателей ее ландшафтных и климатических факторов. В качестве климатических факторов рассматривались характеристики, значения которых получены в ходе метеорологических наблюдений: $T_{\text{Год}}$, $СОТ$, $СПТ$, F и другие. Под ландшафтными факторами подразумеваются таковые, связанные с поверхностью почв и растительным покровом, количественные характеристики которых можно разово измерить непосредственно на местности: высота растительного и снежного покрова, элементов рельефа, мощность органогенного горизонта, экспозиция склонов и т.д. В данной

работе температура почвы не рассматривается в качестве климатического фактора, так как является предметом исследований.

Георадиолокационное и ручное зондирование применяли для определения глубины залегания кровли ММП. Геоинформационные, статистические и математические методы исследований применяли при анализе климатических и ландшафтных факторов, обуславливающих геокриологическое состояние и температурные режимы почв.

Расчеты климатических характеристик производили на основе баз данных региональных метеостанций и собственных мониторинговых наблюдений. Из климатических параметров рассчитывали: среднегодовую температуру воздуха ($T_{\text{Год}}$, °С), суммы отрицательных (СОТ) и положительных (СПТ) температур воздуха (°С·сут), годовое количество осадков ($P_{\text{СР}}$, мм), зимнее (P^w) и летнее (P^s) количество осадков (мм). Для оценки влияния температуры воздуха на температурные режимы почв рассчитывали индекс морозности воздуха F (Nelson, Outcalt, 1987). Измерения температуры почв и подстилающих пород выполняли цифровыми логгерами Onset Hobo: U-12-008 с датчиками, установленными на поверхности почвы и глубинах 0,2, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10 м. По результатам измерений рассчитывали среднегодовые температуры ($T_{\text{ПГод}}$), суммы положительных (СПТп) и отрицательных температур (СОТп) почв и подстилающих пород. При анализе изменений температурных режимов почвогрунтов в котловине осушенного озера использовали данные, предоставленные компанией «Полярноуралгеология» (Kaverin et al., 2017).

На пикетах мониторинговых площадок ежегодно в сентябре градуированным металлическим зондом измеряли мощность СТС (ГОСТ..., 1984), оптическим нивелиром – изменения поверхности почв. На площадках выполнен дополнительный комплекс измерений ландшафтных факторов мощности СТС: высоты растительного и снежного покровов, влажности и температуры почв. На площадке 4Гт определяли экспозицию и углы склонов, высоту элементов микрорельефа, глубину залегания почвенно-грунтовых вод, значения индекса листовой поверхности (LAI). При проведении мультирегрессионного анализа глубина сезонного протаивания в модели выступала в качестве зависимой переменной. Предикторами многомерной регрессионной модели являлись количественные значения ландшафтных факторов.

Для оптимизации полевых работ с пешими маршрутами при проведении геокриологических и почвенных исследований разработан и применен способ ручного бурения мерзлых горизонтов в почвах и верхнем слое ММП с отбором ненарушенных проб почв (патент № 2673571). Георадиолокационное зондирование кровли ММП проводили георадаром «Zond-12E» с подключенными поверхностными экранированными антеннами частотой 300 и 900 МГц (Radar Systems, Inc., Латвия). Радарограммы обрабатывали в программном пакете Prizm 2.60.02.

Геоинформационный анализ климатических и ландшафтных факторов проводили в программном пакете Erdas Imagine 2014 и ArcGis 9.3. В качестве математической основы для ГИС анализа климатических характеристик использовали данные биоклиматической матрицы WorldClim 1.0 (Hijmans et al., 2005). На основе атрибутивных данных рассчитаны климатические параметры и индексы: $T_{\text{год}}$, СОТ, СПТ, годовое и зимнее количество осадков, индексы морозности (F^a , F), относительной суровости климата (I), сухости (D) и сухости холодного периода (D^w). При построении цифровых карт почв масштаба 1:100000 использовали

методы управляемой классификации спутниковых изображений Landsat 7 ETM+ и Quickbird, ALOS PALSAR и цифровых моделей рельефа (ArcticDEM).

Статистический анализ количественных характеристик климата, растительного и почвенного покровов с визуализацией результатов проводили в программах Microsoft Excel 2010, IBM SPSS, R, STATISTICA 10.0, Matlab 7.0. При расчете коэффициентов корреляции R значимыми считались показатели с уровнем $p < 0,05$. При расчете значений R суммы отрицательных температур воздуха и почвы учитывались со знаком «минус». Для оценки качества мультирегрессионных моделей использовали стандартное отклонение и F -критерий Фишера. При отсутствии нормального закона распределения между ландшафтными и температурными параметрами использовался непараметрический критерий Манна-Уитни (Москалев, Новаковский, 2014) и ранговая корреляция Спирмена (Лакин, 1990). При мультирегрессионном анализе по методике, предложенной Шарым и др. (2011), в пространственной дифференциации среднегодовых температур почв в качестве климатических предикторов использованы средние многолетние нормы среднемесячных температур воздуха ($T_{\text{мес}}$) и количеств осадков ($P_{\text{мес}}$). Авторская (Димо, 1972) и американская системы (Key to Soil Taxonomy, 2014) классификации температурных режимов почв апробированы для анализа температурных данных исследуемых почв.

Глава 4. Строение и свойства почв и подстилающих пород

4.1. Мерзлотные почвы

Почвы бугристых болот представлены торфяными олиготрофными мерзлотными почвами бугров (TO-T-T^{\perp}) и оголенных пятен (T@-T-T^{\perp}), торфяными олиготрофными почвами (TO-T) мочажин. Торфяные залежи мощностью от 1 до 5 м сложены темно-коричневым преимущественно хорошо разложившимся перегнойным торфом. В верхней части почв торфяных бугров с мохово-кустарничковой растительностью формируется грубогумусовый моховой горизонт, подстилаемый торфяными горизонтами большей степени разложенности. Торфяные бугры часто покрыты оголенными торфяными пятнами, формирование которых обусловлено активизацией эрозионных и криогенных процессов (Каверин и др., 2016). Торфяные олиготрофные деструктивные почвы пятен отличаются наличием поверхностного криогенно-оструктурного горизонта, сложенного рыхлым хорошо разложившимся торфом (Каверин и др., 2014).

Сезонномерзлый слой (СМС) почв бугристых болот характеризуется слоистыми и массивными криогенными текстурами. Верхние горизонты СМС торфяных почв имеют повышенную весовую льдистость (200-300 %), постепенно уменьшающуюся вниз по профилю. В ММП содержание льдистость резко снижается и постепенно возрастает с глубиной до 60-70 %, массивные криотекстуры сменяются атакситовыми, сетчатыми и слоистыми. Мощные слои льда (более 5-10 см) на глубине 2-3 м формируют ледогрунтовые ядра в основании торфяных бугров (5Тм).

Мерзлотные почвы бугристых болот кислые, величина рН торфа незначительно возрастает с глубиной. СТС, по сравнению с подстилающими ММП, характеризуется повышенными показателями потенциальной обменной кислотности, относительно низким содержанием обменных оснований (до 20-30 %), возрастающим вниз по профилю. Сфагновый

очес торфяных олиготрофных почв отличается малой зольностью (5-10 %), увеличивающейся вниз по профилю (до 7 % и более). ММП сложены преимущественно низинным торфом из травянистых (осоки) и древесных (береза, ель) растений (Пастухов и др., 2017). Содержание органического углерода почв ($C_{\text{орг}}$) и подстилающих пород бугристых болот составляет 40-50 %. Подстилающие суглинистые горизонты на контакте с торфяной толщей, обогащены $C_{\text{орг}}$ ($\geq 1-2$ %). Вариации содержания N (1-3 %) обусловлены различиями в ботаническом составе и степени разложения торфа. В СТС соотношение C/N выше (17-27 %), а степень разложения торфа ниже, в сравнении с ММП. Торфяные олиготрофные почвы мочажин характеризуются залегающим под моховым очесом (мощность 10-20 см) олиготрофно-торфяным горизонтом (50 см), состоящим из сфагновых мхов разной степени разложенности (≤ 50 %). Олиготрофно-торфяной горизонт отличается низкой (< 5 %) зольностью, сильнокислой или кислой реакцией. Высокие значения C/N ($\geq 30-50$) подчеркивают крайне низкую степень разложенности органического вещества почв.

Среди мерзлотных почв на суглинистых почвообразующих породах наиболее распространены подтипы торфяно-глеземов (T-G-CG \perp) и глеземов мерзлотных (T-G-CG \perp). Суглинистые ММП оглеены по всему профилю, характеризуются слоистыми, массивными и сетчатыми криотекстурами. Толщина ледяных шпиров увеличивается от 1-3 мм (глубина 1 м) до 5-6 см на глубине 5-6 м, объемная льдистость ММП варьирует от 30 до 50 % (Каверин и др., 2016). Глеевые почвы сложены пылеватыми легко- или среднесуглинистыми отложениями, в составе мелкозема преобладают фракции крупной пыли и мелкого песка. Поверхностные органогенные горизонты являются наиболее кислыми ($pH_{\text{H}_2\text{O}}=4-5$) в профиле почв. В суглинистых горизонтах ММП значения pH с глубиной повышаются от кислых до слабощелочных значений ниже 5-6 метров. Содержание $C_{\text{орг}}$ в суглинистых горизонтах СТС – 0,2-3 %, ММП – около 1 % (Каверин и др., 2012).

В озерно-болотных ландшафтах формируются аллювиальные слоистые мерзлотные почвы (O-Ig-IIg-G-CG \perp) озерных террас (Каверин и др., 2014). Поверхностный грубогумусовый горизонт подстилается озерными аллювиальными, часто оглеенными, слоистыми отложениями различного гранулометрического состава. В аллювиальных почвах встречаются погребенные горизонты озерно-болотного генезиса (Десяткин, 2006). Контрастность строения почвенного профиля обуславливает широкий диапазон $pH_{\text{H}_2\text{O}}$ ($5,7\pm 0,3$) и степени насыщенности основаниями (60 ± 11 %), низкое содержание $C_{\text{орг}}$ ($0,5\pm 0,2$ %).

Антропогенно нарушенные почвы характеризуются различной степенью трансформации профилей. В р-не 2 антропогенные нарушения затрагивают только поверхностные горизонты почв, различия по физико-химическим свойствам с фоновыми почвами выражены слабо (Каверин и др., 2019). Верхние горизонты почв колеи зимней дороги, в сравнении с органогенными горизонтами фоновых почв, отличались большими потерями при прокаливании, содержанием гигроскопической влаги, обменных оснований, что обусловлено смешиванием материалов органогенных и минеральных горизонтов при проезде техники. В придорожных понижениях насыпной дороги с цементно-бетонным покрытием сформировались «эмбриоземы слоистые» (O-AУ-Ig), отличающиеся неоднородным сложением и преимущественно супесчаным гранулометрическим составом профиля (Каверин и др., 2020), высокими значениями $pH_{\text{H}_2\text{O}}$ ($7,5\pm 0,1$) и поглощенных оснований ($98\pm 0,6$ %).

4.2. Сезоннопромерзающие почвы

Сезоннопромерзающие почвы тундровых геосистем широко распространены в южной тундре и лесотундре на участках, где ММП отсутствуют, либо залегают на глубине несколько метров (Пастухов, 2008). Здесь широко распространены глееземы криометаморфические (O-G-CRMg-CG) и органо-криометаморфические почвы (O-CRM-C). Для средней части профиля этих почв характерно наличие криометаморфического горизонта CRM (Тонконогов, 2010), генезис которого обусловлен педокриогенным переоструктурированием материала почвообразующей породы (Русанова и др., 2010). По физико-химическим свойствам глееземы криометаморфические и органо-криометаморфические почвы не имеют принципиальных отличий от мерзлотных глееземов. Почвы характеризуются сильнокислой реакцией, связанной в основном с обменным алюминием и ненасыщенностью почвенного поглощающего комплекса верхних горизонтов обменными основаниями. Серогумусовые глеевые почвы (AY-G-CG) отличаются наличием поверхностного серогумусового и глеевого горизонтов, ограниченно распространены под луговыми и травяно-кустарниковыми сообществами на склонах приречных террас (Каверин и др., 2016). Серогумусовые глеевые почвы, в сравнении с глееземами, характеризуются большими значениями зольности (96 %), pH_{H_2O} ($5,3 \pm 0,2$) и содержания органического углерода ($1,5 \pm 0,5$ %).

Светлоземы (O-E-CRM-C) лесных геосистем характеризуются наличием подзолистого, иллювиально-железистого и криометаморфического горизонтов. Формирование этих почв обусловлено взаимодействием процессов глее-альфегумусовой миграции и аккумуляции с криогенным структурным метаморфизмом (Тонконогов и др., 2006). Светлоземы характеризуются сильнокислой реакцией ($pH_{H_2O}=4,6 \pm 0,1$), слабой дифференциацией профиля по содержанию ила ($Kd \leq 1,4$) и полуторных оксидов, низким содержанием C_{ORG} (1-2 %) в суглинистых горизонтах. Степень насыщенности основаниями (10-20 %) верхних горизонтов в светлоземах ниже, по сравнению с автоморфными почвами тундры. Светлоземы северной тайги отличаются более выраженной элювиально-иллювиальной дифференциацией гумуса, в сравнении с аналогами в лесотундре. Улучшение биоклиматических условий и увеличение емкости биологического круговорота к югу повышают интенсивность подзолообразовательного процесса в почвах северной тайги (Тонконогов, 2010).

Глава 5. Температурные режимы почв естественных тундровых и лесных геосистем: ландшафтные и зональные особенности

5.1. Температурный режим мерзлотных почв тундровых геосистем (южная тундра и лесотундра с несплошным распространением ММП)

Особенности температурного режима мерзлотных почв тундровых геосистем изучались в р-нах исследований 3-5 (Каверин и др., 2014). Сезонное промерзание мерзлотных почв начинается в октябре с поверхности, в ноябре отрицательные температуры фиксируются по всему профилю. Средняя (20-50 см) и нижняя части (50-100 см) почв становятся слоями нулевых завес (Сумгин, 1937), где при воздействии на температурное поле фазовых переходов замерзающей влаги наблюдаются околонулевые температуры. Период околонулевых температур в мерзлотных почвах относительно короткий (до 1 месяца и более).

Различия по зимнему температурному режиму ($p < 0,05$) в мерзлотных почвах обусловлены положением в рельефе, определяющим высоту растительного и снежного покровов. На пологих (подветренных) участках (почвы 3То, 5Тп, 4Гт) высота снежного покрова составляет 30-50 см; на наветренных (возвышенных) позициях рельефа (3Тс, 3Ас, 3Гт, 5Тм) – 0-30 см. По суммам отрицательных температур (СОТп) почвы возвышенных участков значительно холоднее (до 2500 °С·сут) таковых пологих участков (до 800 °С·сут). Максимальное охлаждение профиля мерзлотных почв происходит в январе-феврале (до -22 °С), подстилающих многолетнемерзлых горизонтов – в феврале – апреле (до -12 °С). Сезонное протаивание верхних горизонтов начинается в мае, самый теплый месяц в верхних горизонтах почвы – июль или август (до +15 °С), в нижних сезоннотальных горизонтах – август – октябрь (до +2 °С), в ММП – сентябрь-декабрь (-0,1 °С). В летний период мерзлотные почвы пологих участков получают меньше тепла при большей затененности их поверхности кустарничковой растительностью. Общий диапазон среднегодовых температур сезоннотальных горизонтов составил +1,1...-4,8 °С, многолетнемерзлых – -0,2...-4,4° С, наиболее холодными являются почвы торфяных бугров (-2...-4 °С).

Сохранение ММП при их несплошном распространении в пределах почвенного профиля обусловлено как суровостью климата, так и влиянием ландшафтных условий. На возвышенных участках невысокий снежный покров способствует значительному зимнему охлаждению почв. Наличие мощного (≥ 40 см) торфяного горизонта предохраняет мерзлотные почвы от летнего протаивания. Согласно классификации генезиса ММП (Shur, Jorgenson, 2007) гидроморфные мерзлотные почвы (3Тс, 5Тм, 5Тп) в условиях несплошного распространения ММП криолитозоны могут рассматриваться как климатически-обусловленные экосистемно-защищенные (КО+ЭЗ) мерзлотные почвы. В регионе данные почвы являются наиболее холодными как по зимнему, так и летнему температурному режиму, характеризуясь неглубоким сезонным протаиванием (40-60 см). Полугидроморфные суглинистые почвы (3Гт, 4Гт) могут быть отнесены к климатически-обусловленным мерзлотным почвам с частичной экосистемной защитой (КО^{ЭЗ}). Данные почвы могут подвергаться значительному зимнему промерзанию, однако характеризуются большей глубиной сезонного протаивания (до 1 м и более). Автоморфный супесчаный профиль 3Ас может быть рассмотрен в качестве климатически-обусловленной (КО) мерзлотной почвы. Почва характеризуется холодным зимним температурным режимом, однако в летний период глубина сезонного протаивания превышает 1 м.

5.2 Температурный режим сезоннопромерзающих почв тундровых геосистем (южная тундра и лесотундра с прерывистым распространением ММП)

Сезоннопромерзающие почвы тундровых геосистем развиты в условиях глубокого залегания либо отсутствия ММП, функционируя при повышенной высоте растительности и снежного покрова (50-150 см), характерной для пологих и пониженных участков в южной тундре, увалов с примыкающей редколесной растительностью в лесотундре. В региональных тундровых геосистемах специфика температурного режима сезоннопромерзающих почв, как и мерзлотных, обусловлена положением в рельефе, определяющим интенсивность снегонакопления, высоту и тип растительности (Каверин, Пастухов, 2017). По зимнему

температурному режиму почвы мохово-кустарничковых тундр (5Гк, 5К) значительно холоднее (до 1000 и ниже °С·сут) таковых на участках крупнокустарничковых (4Гк, 5Кг) тундр (до 200 °С·сут). Маломощный снежный покров (до 50 см) обуславливает большее зимнее охлаждение почв в мохово-кустарничковых тундрах, по сравнению с профилями крупнокустарничковых сообществ. В профиле сезоннопромерзающих автоморфных почв тундры наблюдается длительный процесс (до 2 месяцев и более) осенне-зимнего промерзания почв с преобладанием околонулевых температур. Наибольшая продолжительность периода околонулевых температур (3-4 месяца и более) характерна для относительно теплых почв крупнокустарничковых тундр, где средняя часть их профиля (30-60 см) зимой, как правило, находится в пластичномерзлом состоянии. В профиле относительно холодных сезоннопромерзающих почв (0-100 см) в зимний период преобладают отрицательные температуры.

По сравнению с почвами под сомкнутой крупнокустарничковой растительностью, поверхностные горизонты почв (0-20 см) мохово-кустарничковых тундр летом прогреваются больше (СПТп>1000 °С·сут), однако их нижние горизонты (50-100 см) холоднее (<300-600 °С·сут). Общий диапазон среднегодовых температур в сезоннопромерзающих почвах составил +3...-3 °С. В целом, температурный режим сезоннопромерзающих почв под мохово-кустарничковой растительностью является в большей мере климатически-обусловленным, по сравнению с почвами, где выражено отепляющее влияние крупнокустарничкового яруса.

5.3. Температурный режим почв многолетнемерзлых бугристых болот (крайнесеверная тайга с редкоостровным распространением ММП)

Особенности температурного режима почв бугристых болот (7Тм, 7Тм², 7Тм³) изучены на крайнем южном пределе распространения многолетнемерзлых пород Восточно-Европейской равнины (Каверин, Пастухов, 2018). При малой высоте (0,2-0,4 м) снежного покрова почвы торфяных бугров характеризуются суровым зимним температурным режимом (СОТ≥1300 °С·сут). В торфяных буграх сезонные колебания температур, хорошо выраженные в сезоннотальных горизонтах, постепенно затухают в подстилающей многолетнемерзлой толще (до 10 м). В горизонтах СТС минимальные температуры СТС (до -22 °С) фиксируются в феврале, в верхнем горизонте (1-3 м) ММП (до -6 °С) - в марте-апреле, на глубине 5 м – мае-июне (до -2 °С) (Рисунок 2). В почвах мочажин (7То, 7То²) зимнее промерзание охватывает лишь верхние горизонты (0-20 см), где наблюдаются околонулевые температуры в отрицательном диапазоне. В почвах мочажин минимальные среднемесячные температуры (-0,1...-2,3 °С) фиксируются в феврале, в подстилающих талых отложениях (2-3 м) данный период смещается к маю – июню (+0,3...+1,4 °С) (Рисунок 2).

Максимальные среднемесячные температуры (Т_{мес}) (+10...+11 °С) на поверхности почв торфяных бугров наблюдаются в июле, в ММП (-0,1...-1,2 °С) с сентября по декабрь. В почвогрунтах мочажин максимальные значения Т_{мес} изменяются от +12 °С (июль) на поверхности почв до +1 °С на глубине 2-5 м (декабрь). Общий диапазон среднегодовых температур горизонтов СТС в почвах бугров составил +2,0...-2,0 °С, в подстилающих ММП - 0,1...-2,2 °С. Почвы мочажин характеризуются относительно высокими значениями СПТп (80-1700 °С) (Каверин и др., 2018).

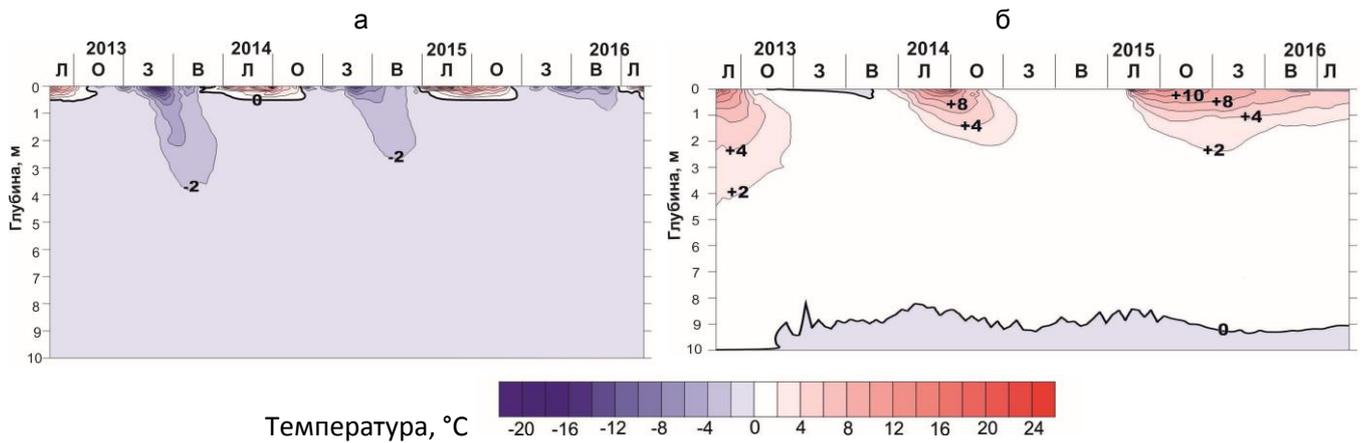


Рисунок 2 – Температурные хроноизоплеты почв и подстилающих пород бугристых болот в р-не 7, 2013-2016 гг.: а – торфяный многолетнемерзлый бугор (7Тм); б – мочажина (7То). Л-лето, О-осень, З-зима, В-весна.

В мерзлотных почвах бугристых болот зимой повышенная теплопроводность ($0,015-0,03 \text{ см}^2/\text{с}$) льдистых сезонно- и многолетнемерзлых торфяных горизонтов способствует их сильному охлаждению (Калюжный, Лавров, 2019). Летом сезонноталый торфяной слой, наоборот, становится эффективным теплоизолятором, предохраняя ММП от быстрого протаивания. Таким образом, в неблагоприятных для сохранения ММП климатических условиях южного предела криолитозоны, мерзлотные почвы остаются относительно устойчивыми к протаиванию ввиду их исключительной экосистемной защиты в контурах бугристых болот.

5.4. Температурный режим сезоннопромерзающих почв лесных геосистем

(лесотундра с прерывистым распространением ММП, крайнесеверная и северная тайга со сплошным распространением сезоннопромерзающих почв)

Изучены особенности температурного режима автоморфных почв лесных геосистем (Каверин и др., 2016). По зимнему температурному режиму светлоземы лесотундры (5Сг, 5Си) и крайнесеверной тайги (7Си) холоднее ($0...82 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{сут}$) своих аналогов (8Ст, 8Сг) в северной тайге ($0...26 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{сут}$), находящейся вне криолитозоны. Наибольшие различия значений СОТп наблюдаются в нижней части профиля почв и обусловлены общей тенденцией снижения температуры почвообразующих пород при переходе к лесотундре, ландшафты которой расположены в подзоне несплошного распространения ММП. В почвах лесотундры устойчивые отрицательные температуры наблюдается в верхней и средней части профиля (0-60 см), тогда как северотаежные почвы, как правило, характеризуются промерзанием верхних горизонтов (до 50 см).

Оттаивание почв лесных геосистем начинается в апреле-мае, максимальные значения $T_{\text{МЕС}}$ в средней части профиля ($+4...+12 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдаются в июле-августе, на глубине 1 м ($+4...+10 \text{ }^\circ\text{C}$) в августе-сентябре. Светлоземы лесотундры характеризуются меньшими значениями СПТп ($700-800 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{суток}$) в сравнении с северотаежными аналогами ($1300-1400 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{суток}$), при этом температурные различия увеличиваются с глубиной. В сравнении с почвами тундры, в лесных геосистемах наблюдается меньшая вариация среднегодовых температур по профилю почв. Общий диапазон $T_{\text{ПГОД}}$ на глубинах 20 и 50 см составил $1,5...3,8 \text{ }^\circ\text{C}$, и

1,5...3,7 °С соответственно. В почвах таежной зоны среднегодовые температуры (+2...+4 °С) выше аналогов в лесотундре (около +2 °С). В целом, температурные различия лесных почв определяются зонально-биоклиматическими особенностями южной части регионального экотона (лесотундра – северная тайга).

Глава 6. Анализ влияния ландшафтных изменений на температурные режимы почв

6.1. Влияние ландшафтных изменений на температурный режим почв постагрогенных геосистем (южная тундра с прерывистым распространением ММП)

В период исследований (2009-2016 гг.) почвы постагрогенных участков (4Гп', 4Гк') зимой были холоднее (до -600 °С·сут) целинных аналогов (Каверин и др., 2019). За последние десятилетия различия значений СОТп в профилях 4Гк' и 4Гк, наблюдаемые И.Б. Арчевой (2007), значительно сократились на фоне закустаривания постагрогенных участков. За период 2000-2016 гг. значения спектральных характеристик почвенно-растительного покрова постагрогенных геосистем постепенно приблизились к таковым фоновых (Рисунок 3).

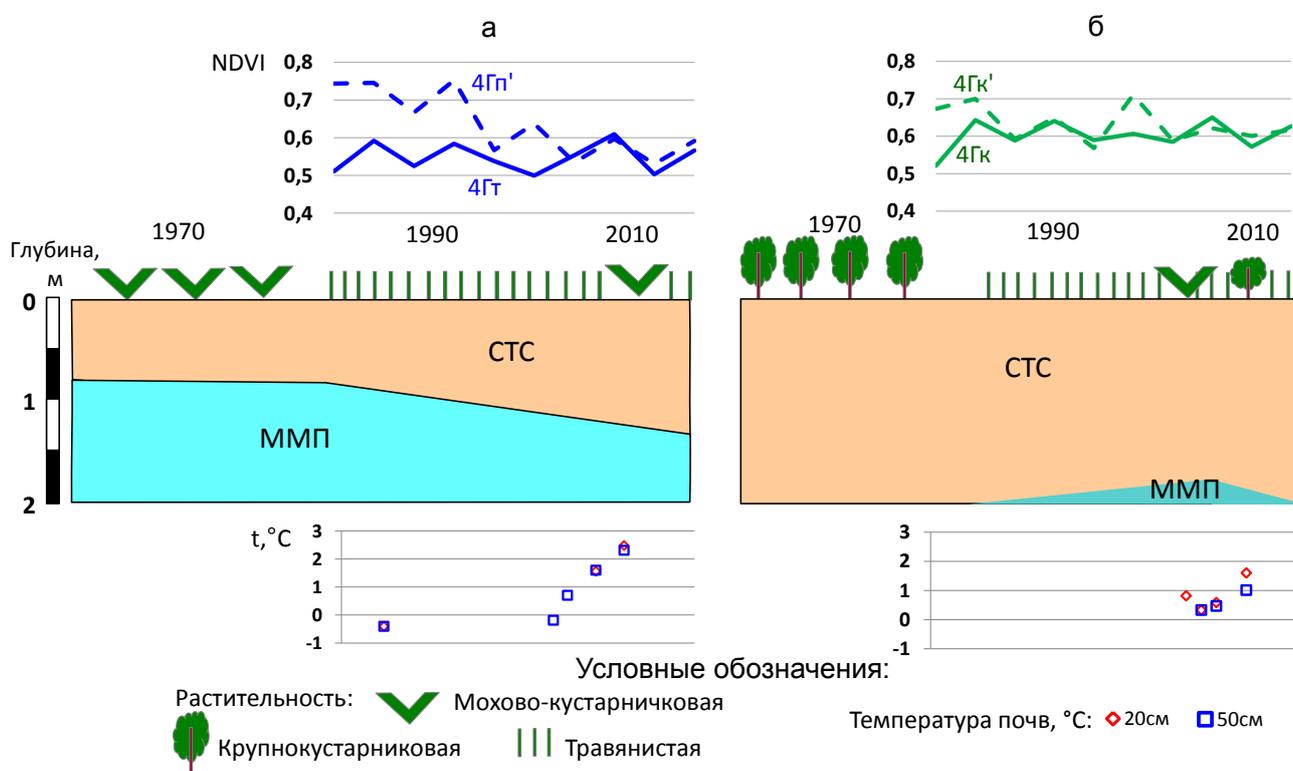


Рисунок 3 – Динамика изменений индекса NDVI, глубины залегания кровли многолетнемерзлых пород (м) и температуры почв (°С) в постагрогенных геосистемах р-на 4, сформировавшихся при освоении: а – мохово-кустарничковых тундр (4Гп'); б – крупнокустарничковых тундр (4Гк'). Сплошными линиями на графике показаны значения NDVI для фоновых сообществ (4Гт, 4Гк).

Самовосстановительная сукцессия тундровой растительности в луговых геосистемах началась после снятия сельскохозяйственной нагрузки в конце 1990-х гг. на фоне климатических изменений последних лет (Biskaborn et al., 2019). В постагрогенный период (2000-2010-е гг.), по сравнению с сельскохозяйственным (1980-1990-е гг.), в почвах луговых сообществ повысились значения СПТп. Однако, антропогенно-трансформированные почвы прогревались хуже целинных аналогов ввиду наличия на их поверхности плотного

травянистого очеса (Арчегова и др., 2009). В 2009-2016 гг. почвы постагрогенных геосистем, как и их целинные аналоги, характеризовались преимущественно положительными среднегодовыми температурами ($+1,3 \pm 0,3$ °С). Почвы геосистем, сформированных в условиях преобладания кустарничковых тундр (4Гп', 4Гт) в целом были холоднее таковых ($T_{\text{ПГОД}}=0,8 \pm 0,1$ °С), формирующихся в массивах с кустарниковыми (4Гк', 4Гк) сообществами ($T_{\text{ПГОД}}=1,9 \pm 0,2$ °С).

В условиях доминирования мелкоерниковой растительности с близким к поверхности залеганием ММП (до 1 м) разрушение теплоизолирующего торфяного горизонта при сельскохозяйственном освоении способствовало понижению уровня кровли ММП до 1,5 м на участке 4Гп' (Mazhitova, Lapteva, 2004). До освоения здесь функционировали климатически-обусловленные мерзлотные почвы с частичной экосистемной защитой, но при распашке поверхностного органогенного горизонта потеряли защиту, оставшись преимущественно климатически-обусловленными (Shur, Jorgenson, 2007). Активизация самовосстановительной сукцессии на фоне смягчения климатических условий привела к опусканию кровли ММП в профиле 4Гп' с 1,5 до 1,8 м. Сведение крупнокустарниковой растительности при сельскохозяйственном освоении участка 4Гк', напротив, обусловило уменьшение снегонакопления и усиление зимнего охлаждения почв с поднятием кровли ММП до глубины 1,5 м. Дальнейшая активизация самовосстановительной сукцессии тундровой растительности привела к усилению снегонакопления и смягчению зимнего климата почв, что обусловило протаивание ранее аградированных ММП до глубины 2 м.

6.2. Влияние ландшафтных изменений на температурный режим почв при эксплуатации зимней дороги (типичная тундра с преимущественно сплошным распространением ММП)

Исследованы особенности изменений температурных режимов почв тундры, функционирующих в условиях зимних дорог – наиболее распространенных антропогенных нарушений в Арктике (Быков, 1977). Эксплуатация зимней дороги привела к значительным повреждениям кустарничков *Salix sp.*, напочвенных лишайников *Betula nana*, *Cladonia rangiferina*, в контурах дорог их средняя высота снизилась на 30-40 % (Каверин и др., 2019). В почвах колеи частично или полностью разрушился верхний грубогумусовый горизонт, мощность СТС и глубина залегания почвенно-грунтовых вод изменились дифференцированно в зависимости от типа геосистем. На участках с кровлей ММП на глубине 1-2 м и более (2Аг', 2Гк', 2Гт') разрушение кустарниковой растительности способствовало уменьшению мощности СТС на 10-50 %. На участках колеи, пересекающей мохово-кустарничковые сообщества, мощность СТС, напротив, увеличилась на 14-16 %. Статистический анализ показал, что повышение мощности СТС коррелирует с увеличением высоты *Salix sp.* ($R=0,9$), *Carex sp.* ($R=0,7$) и *Comarum palustre* ($R=0,7$). Уменьшение мощности СТС наблюдается при повышении высоты кустарничков ($R=-0,7$), *Ledum sp.* ($R=-0,7$) и увеличении мощности торфяного горизонта ($R=-0,4$). Мощность СТС значимо коррелирует с температурами почв: $СОТ_{\text{П}}$ ($R=0,7$) и $СПТ_{\text{П}}$ ($R=0,4$).

Почвы колеи зимней дороги замерзают дольше на участках с низкорослой кустарниковой растительностью (2Ас', 2Тм', 2Гк'), тогда как уничтожение высоких кустарниковых ярусов на участках 2Аг' и 2Гт' приводит к усилению сезонного промерзания нарушенных почв, по

сравнению с их ненарушенными аналогами (Рисунок 4), что в условиях тундр региона объясняется снижением снегонакопления (Мажитова, 2008). Значения СОТп, как и глубины сезонного протаивания, хорошо коррелируют с высотой ивнякового яруса ($R=0,8$).

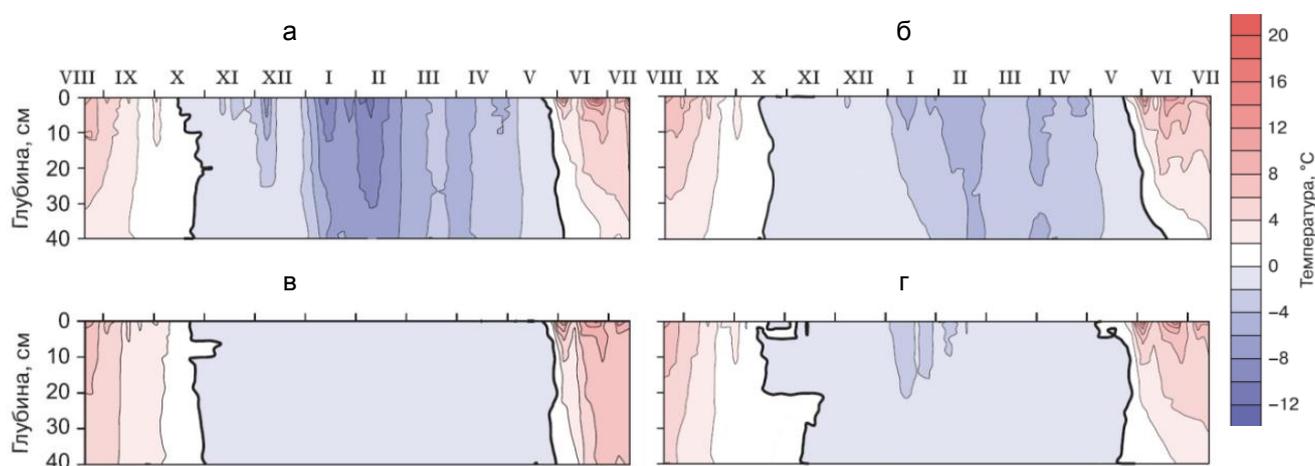


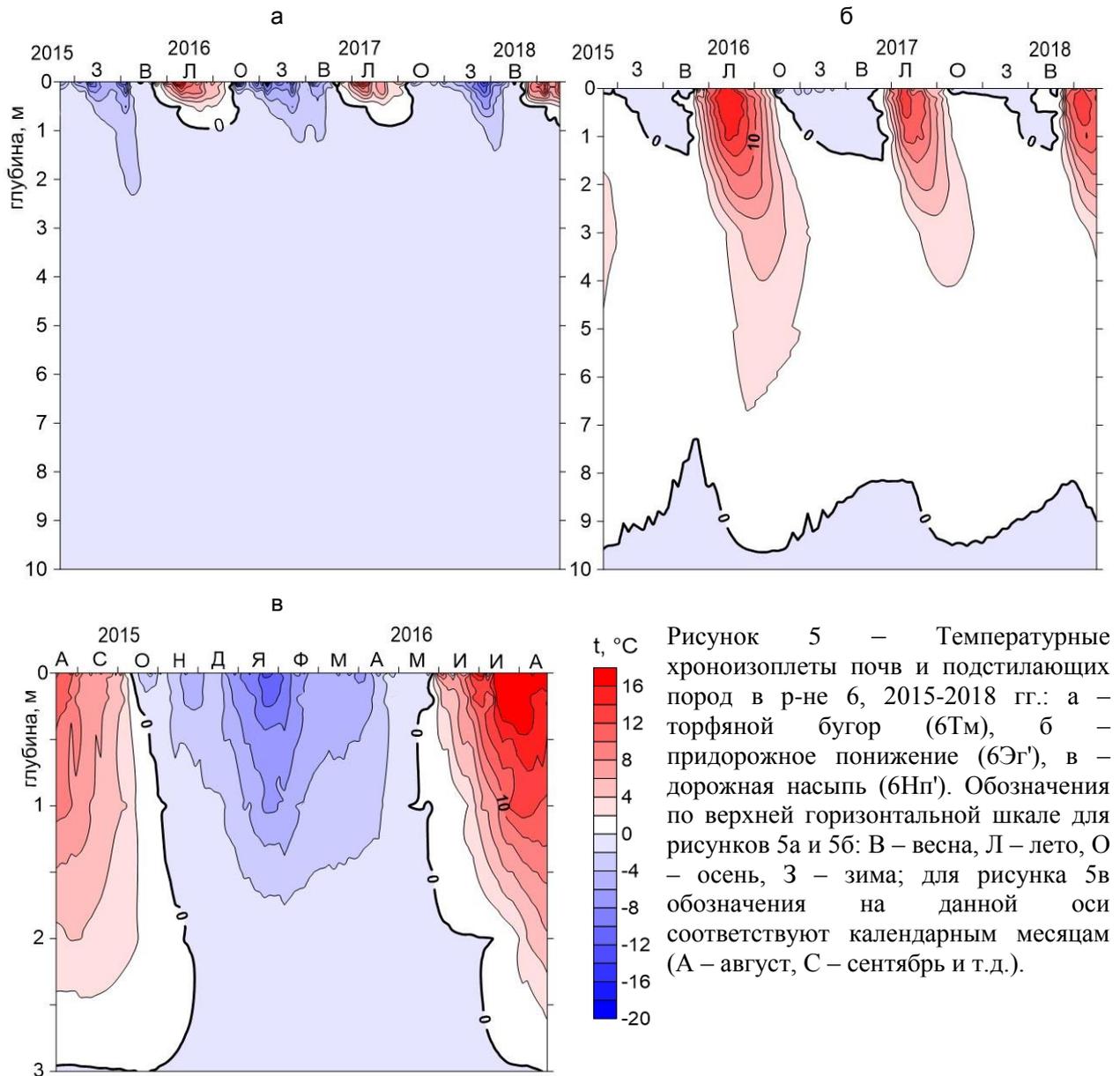
Рисунок 4 – Температурные хроноизоплеты почв (0-40 см) в 2014-2015 гг. ненарушенных (а – 2Ac; в – 2Ag) и нарушенных участков (в – 2Ac'; г – 2Ag') в р-не 2. Римскими цифрами указаны календарные месяцы года.

Летние температурные характеристики естественных и антропогенно-нарушенных почв различаются. Поверхность антропогенно-нарушенных почв колеи теплее ненарушенных на участках межувалистого понижения 2Ac' и бугристого болота 2Тм'. На участке 2Тм' это объясняется экскавацией на поверхность колеи оголённого черного торфа, на 2Ac' – незначительной глубиной (5 см) колеи при поврежденном кустарниковом ярусе. С глубины 20 см все антропогенно-нарушенные почвы зимней дороги характеризуются пониженными температурами по сравнению с их естественными аналогами (Рисунок 4). Уменьшение летних температур с глубиной в почвах колеи объясняется большей аккумуляцией зимнего холода и относительно поздними сроками оттаивания снега в колеях. По годовым характеристикам почвы колеи холоднее ненарушенных на участках кустарниковых тундр и бугристого болота, в среднем на 0,5 °C. С глубиной среднегодовые температуры снижаются с большим градиентом ($\geq 2,5$ °C/м) в антропогенно-нарушенных почвах, в сравнении с ненарушенными (0...2 °C/м). Таким образом, трансформация поверхностного органогенного горизонта в колее зимних дорог обуславливает относительно слабые изменения температурного режима почв. Это связано с незначительными нарушениями экосистемной защиты почв и высокой степенью их климатической обусловленности в подзоне сплошного распространения ММП (Shur, Jorgenson, 2007).

6.3. Влияние ландшафтных изменений на температурный режим почв и подстилающих пород при эксплуатации автодороги с цементно-бетонным покрытием (лесотундра с массивно-островным распространением ММП)

Исследованы температурные режимы почв, функционирующих в условиях эксплуатации насыпных автодорог, основных транспортных артерий, используемых для освоения углеводородных месторождений в криолитозоне (Каверин и др., 2020). Почвы и подстилающие

породы дорожной насыпи (6Нп'), как и ненарушенного бугристого болота (6Тм) характеризуются сильным зимним охлаждением при малой высоте снежного покрова (Рисунок 5).



Почвы придорожного понижения (6Эг') отличаются мягким зимним климатом (до 100 °С·сут) при высоком снежном покрове ($\geq 1,5$ м). «Эмбриозем» придорожного понижения промерзает очень медленно, отрицательные температуры (0...-2 °С) наблюдаются в верхнем 1,5-метровом слое почвогрунтов. Среднемноголетняя нулевая изотерма в почвах придорожного понижения проходит значительно ниже расчетных значений, определенных для территории Большеземельской тундры (Исаков, 2014). Это объясняется недооценкой при расчетах эффекта снегонакопления в основании дорожной насыпи, что обуславливает глубокое залегание кровли ММП.

По летнему температурному режиму почвы придорожного понижения и дорожной насыпи схожи, в отличие от торфяной мерзлотной почвы, характеризуются быстрым и глубоким прогреванием (Рисунок 5). Большему прогреванию почв в придорожном понижении

способствуют слабое зимнее промерзание, повышенная влажность насыпных песчано-супесчаных горизонтов, отсутствие или фрагментарность верхнего органогенного горизонта. Глубокое протаивание в основаниях откосов насыпи увеличивает риск снижения устойчивости земляного полотна и служит причиной его неравномерных деформаций (Дроздов, Шабуров, 2014; Гребенец, Исаков, 2016). Глубокое прогревание грунтов дорожной насыпи обусловлено отсутствием растительного покрова и верхнего органогенного горизонта, дренажом насыпных песков и наличием бетонных плит.

Общий диапазон среднегодовых температур почвы бугристого болота в 2015-2018 гг. составил +1,5...-1,1 °С, ММП – -0,6...-1,0 °С. Почвы придорожного понижения характеризуются преимущественно положительными среднегодовыми температурами (+2...+4 °С). По среднегодовым характеристикам почвогрунты дорожной насыпи характеризуются положительными температурами (до +1 °С), где контраст температур в течение года определяет глубину залегания кровли ММП на уровне 3-4 м. Значительное повышение температуры почв и подстилающих пород наряду с глубоким протаиванием ММП объясняется полным разрушением экосистемной защиты почв бЭг' при удалении торфяной толщи и кардинальным изменением рельефа в процессе строительства дороги. Общая ширина отепляющего влияния автодороги, определенная георадиолокационным зондированием составила 50 м (Каверин и др., 2018). Почвогрунты бНп' функционируют в качестве климатически-обусловленных профилей, которые в условиях дорожной насыпи характеризуются контрастным годовым циклом температурного режима.

6.4. Влияние ландшафтных изменений на температурный режим почв и подстилающих пород котловины термокарстового озера после ее искусственного осушения (южная тундра с преимущественно сплошным распространением ММП)

Ландшафтные изменения, происходившие после искусственного осушения термокарстового озера Опытное (р-н 3), позволяют анализировать сценарии пространственно-временных изменений температурных режимов почв, сопряженные с трансформацией мерзлотных условий геосистем (Kaverin et al., 2017). Среднегодовая температура воздуха за период исследования изменений температурного режима почв в котловине осушенного озера (1982-1995 гг.) составила -5,5 °С, средnezимнее количество осадков – 120 мм, средняя высота снежного покрова – 0,75 м. На основе анализа изменений температуры воздуха и многолетнемерзлых пород в котловине озера период исследований разделен на 3 субпериода: 1) 1982-1984 гг. ($T_{\text{Год}} = -5,1 \dots -5,4$ °С); 2) 1985-1987 гг. ($T_{\text{Год}} = -7,0$ °С); 3) 1988-1995 гг. ($T_{\text{Год}} = -5,0$ °С). В 1-й субпериод (1982-1985 гг.) во всей толще почв и подстилающих пород осушенной котловины сохранялись положительные значения $T_{\text{ПГод}}$ (Рисунок 6), что было характерно и для ранее существовавшего здесь подозерного талика (Какунов, 1980).

В первый субпериод происходило формирование заболоченных лугов при слабой пространственной дифференциации высоты снежного покрова. В краевых частях котловины, примыкающих к склонам озерной террасы, высота снежного покрова была максимальной (160-180 см), внутри котловины снегонакопление было менее интенсивным (50±6 см). Значительное снижение температуры почв в 1985-1987 гг. обусловлено уменьшением температур воздуха и высоты снежного покрова. Устойчивые отрицательные значения $T_{\text{ПГод}}$ (0...-1 °С) в верхнем

слое почв и подстилающих пород (1-5 м) обусловили формирование приповерхностных многолетнемерзлых горизонтов по всей осушенной котловине (Рисунок 6).

Агградация ММП сопровождалась мерзлотным пучением и формированием торфяных бугров. Повышенная способность к морозному пучению органо-минеральных почв котловины способствует льдонакоплению (Shur, Jorgenson, 2007). При образовании торфяных бугров луговая растительность отмирала, на их поверхности происходила экскавация торфа с последующей экспансией тундровой мохово-лишайниково-кустарничковой растительности.

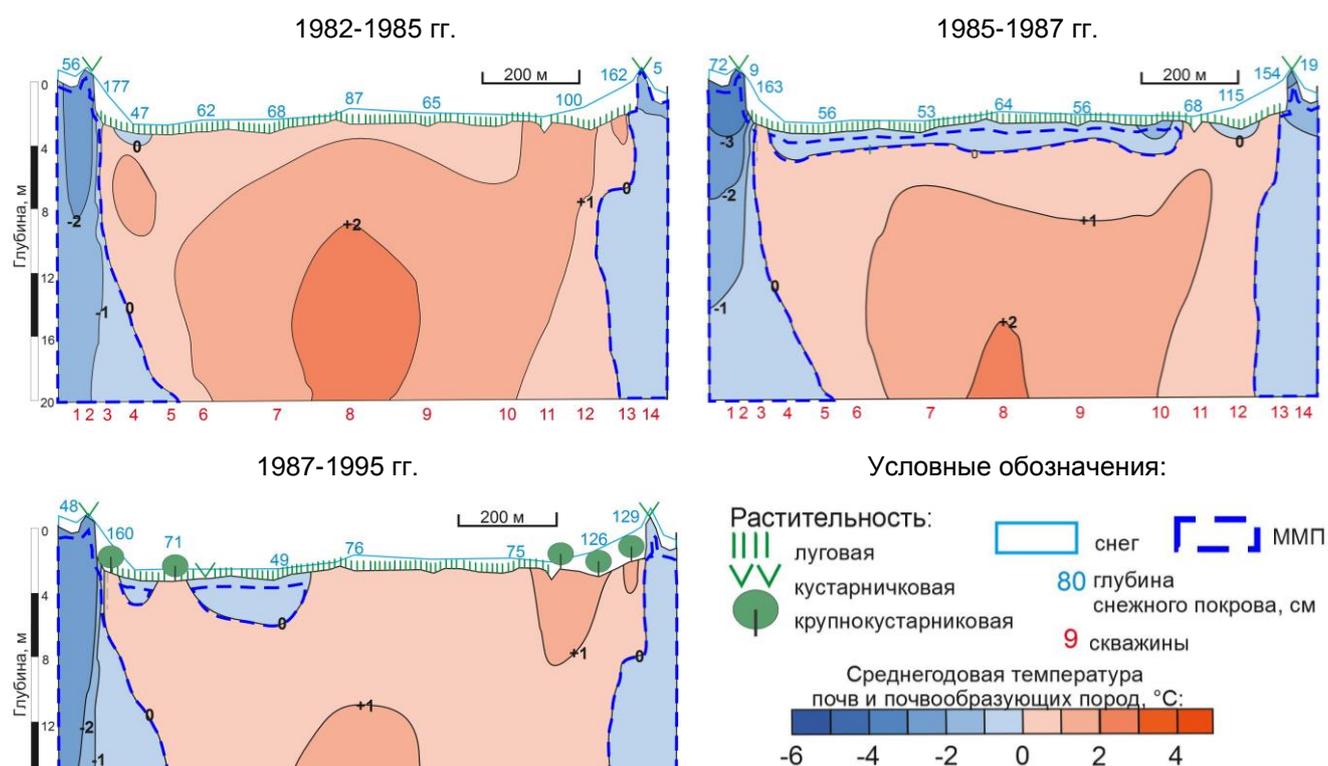


Рисунок 6 – Осредненные за период 1982-1995 гг. среднегодовые температуры почвогрунтов котловины осушенного озера и озерных террас (температурный профиль выполнен вдоль трансекты со скважинами), р-н 3.

В 1988-1995 гг. температуры почв и подстилающих пород увеличивались при повышении значений $T_{ГОД}$ и дальнейших сукцессионных изменений почвенно-растительного покрова, однако это не привело к полному протаиванию ММП в котловине. Усиление снегопереноса со сформировавшихся бугров в понижения обусловили большую пространственную дифференциацию температурных и мерзлотных условий функционирования почв. В луговых и, особенно, ивняковых сообществах происходило интенсивное снегонакопление, способствовавшее частичному протаиванию ранее сформированных ММП (Рисунок 6).

Таким образом, изначально в пределах котловины сформировались климатически-обусловленные мерзлотные почвы. Позднее в ходе сукцессионных изменений усилилось действие ландшафтных факторов, что привело к пространственной дифференциации температурных режимов почв. Многолетнемерзлые породы частично протаяли, оставшиеся мерзлотные почвы продолжили функционировать в качестве климатически-обусловленных экосистемно-защищенных.

Глава 7. Анализ климатических и ландшафтных условий формирования температурного режима почв

7.1. Геоинформационный анализ климатических условий формирования температурного режима почв

Геоинформационный анализ позволил определить климатические характеристики, определяющие зональность мерзлотных почв (Рисунок 7) в регионе исследований (Каверин и др., 2019). Пространственная дифференциация границ геокриологических подзон взаимосвязана с почвенной зональностью, прослеживающейся в увеличении доли ММП и, соответственно, мерзлотных почв к северу, что сопровождается уменьшением глубины сезонного протаивания и температуры почв (Геокриологическая..., 1997; Почвенная..., 1988).

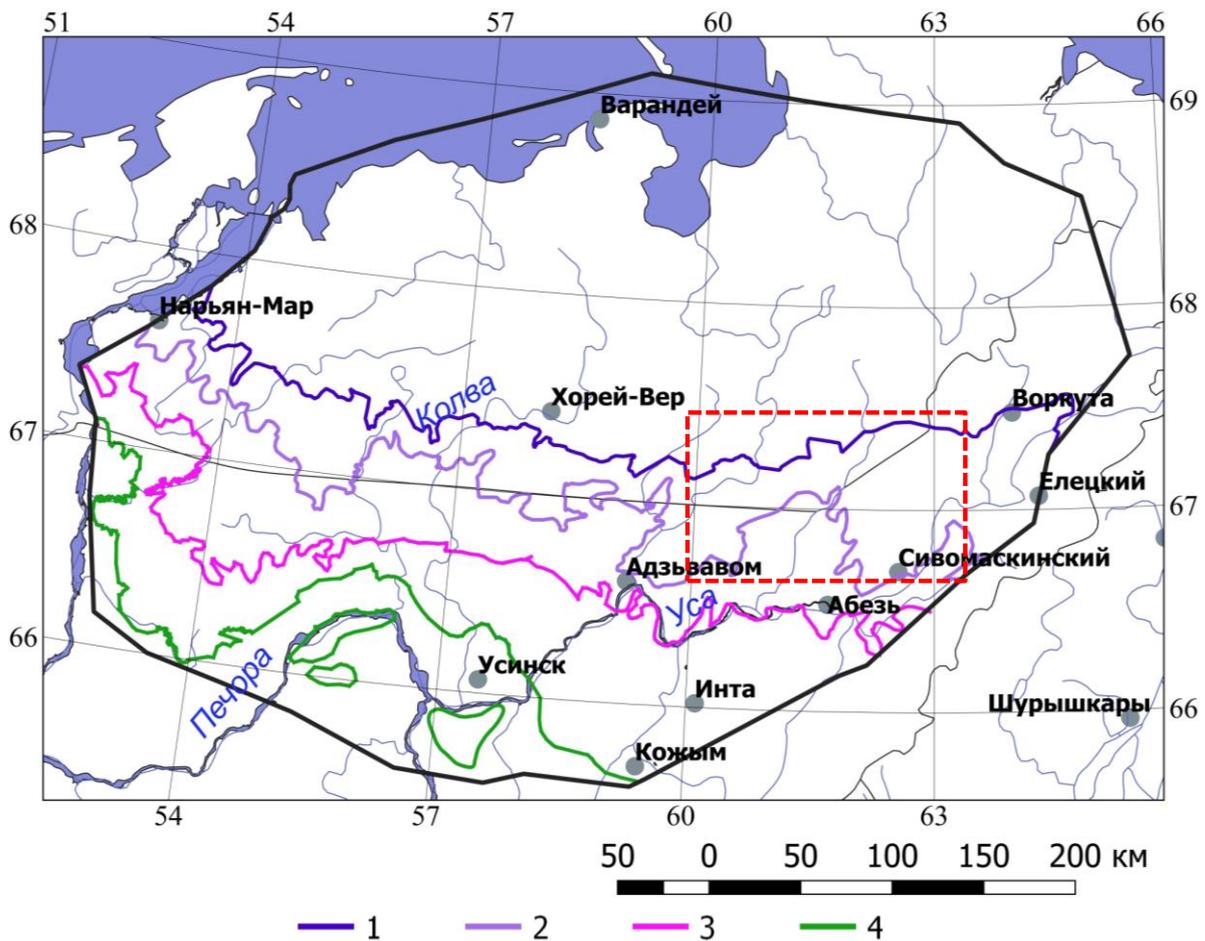


Рисунок 7 – Почвенно-геоцириологические границы, выделяющие подзоны с распространением ММП: 1 – сплошным; 2 – прерывистым; 3 – массивно-островным; 4 – редкоостровным (Осадчая, Тумель, 2012). Красной пунктирной линией показан контур почвенной карты центральной части регионального тундрово-таежного экотона.

Сочетание геоинформационного и статистического анализов показало, что значимыми климатическими маркерами, описывающими географическое положение региональных почвенно-геоцириологических границ, могут быть использованы показатели со средними значениями коэффициентов вариации в диапазоне 0-4: СПТ ($Kvar=3,8\pm 0,2$), P_{CP} ($Kvar=3,5\pm 0,3$), индекс сухости D ($Kvar=3,5\pm 0,2$), индекс морозности F ($Kvar=2,2\pm 0,3$). Наиболее сильным климатическим маркером географического положения почвенно-геоцириологических границ

является индекс морозности воздуха F (Каверин и др., 2019), расчеты которого перспективно применять при анализе современных и прогнозных климатических сценариев (Кислов и др., 2008). Средними маркерами почвенно-геокриологических границ условно можно считать климатические характеристики и индексы с коэффициентами вариации 4-8: количество осадков холодного периода P^w ($Kvar=7,7\pm 1,5$), альтернативный индекс морозности F^a ($Kvar=5,7\pm 0,8$), индекс относительной суровости климата I ($Kvar=6,5\pm 1,2$). Относительно слабыми климатическими маркерами исследуемых границ определены таковые со значениями $Kvar > 8$: $T_{Год}$ ($Kvar=16,9\pm 1,7$), $СОТ$ ($Kvar=8,3\pm 1,4$), индекс сухости холодного периода D^w ($Kvar=12,9\pm 3,0$).

При значении $F \geq 0,62$ в регионе мерзлотные почвы функционируют в условиях сплошного распространения ММП преимущественно в виде климатически-обусловленных профилей. Среднегодовые температуры почв варьируют преимущественно в пределах $0 \dots -4$ °С. Локализация массивов мерзлотных почв в подзонах прерывистого и массивно-островного распространения ММП ($F=0,60-0,62$) определяется как климатическими, так и ландшафтными факторами. Экосистемная защита мерзлотных почв сохраняется преимущественно в условиях малоснежных болотных и суглинистых массивов ($T_{Год} = -0,5 \dots -2$ °С). В подзоне редкоостровного распространения ($F=0,57-0,60$) мерзлотные почвы существуют исключительно в экосистемно защищенных условиях изолированных массивов бугристых болот ($T_{Год} = 0 \dots -0,5$ °С). Уравнение множественной регрессии, описывающее смену климатических условий на границах подзон мерзлотных почв, подтверждает полученные результаты: $\ln SubZ = 2,897 \cdot F - 0,1200 \cdot \Delta T - 3,364 \cdot (F - F_{cp})^2 - 0,04410 \cdot P_{VII} + 4,386$, $R^2 = 0,831$ ($Degr = 0,70$ %), $P_{CP} < 10^{-6}$ (2) (Каверин и др., 2019). Соответственно уравнению (2), географическая зональность мерзлотных почв на 83% объясняются климатическими факторами.

7.2. Геоинформационный анализ ландшафтных условий формирования температурного режима почв

Геоинформационный анализ структуры почвенного покрова позволяет оценить влияние ландшафтных факторов на пространственную дифференциацию температурных режимов и глубины сезонного протаивания почв (Каверин и др., 2012). При построении цифровых почвенных карт усовершенствован метод управляемой классификации спутниковых снимков, адаптированный к структуре почвенного покрова региона. Разработанный алгоритм позволяет дифференцировать ландшафты с сезоннопромерзающими и мерзлотными почвами с различной глубиной залегания ММП, учитывая факторы их функционирования. При геоинформационном анализе структуры почвенного покрова центральной части регионального таежно-тундрового экотона установлено, что торфяные мерзлотные почвы (КО+ЭЗ) с СТС мощностью до 1 м занимают 18 % (Рисунок 7), автоморфные мерзлотные почвы (КО) с глубиной залегания ММП от 1 до 3 м – 13% (Пастухов и др., 2016). Полугидроморфные мерзлотные почвы (КО^{ЭЗ}) с залеганием ММП на глубине 1-2 м занимают около 26 % экотона. Широкое распространение мерзлотных почв обусловлено слабой дренированностью территории и широким распространением бугристых болот на водораздельных пространствах тундры и лесотундры. Сезоннопромерзающие почвы тундровых и лесных геосистем занимают 43% территории экотона.

В структуре почвенного покрова участка со сплошным распространением ММП (р-н 1) преобладают КО мерзлотные типы почв. Почвы с мощностью СТС до 1 м занимают значительную долю участка (38 %) (Каверин и др., 2016), доля КО+ЭЗ составляет около 9 %. Почвы с подстилением ММП в интервале 1-2 м и более занимают 54% территории, что связано с утепляющим воздействием крупнокустарниковой растительности в северных тундрах (Елсаков, Кулюгина, 2014). В подзоне редкоостровного распространения ММП экосистемно-защищенные (ЭЗ) мерзлотные почвы занимают 9,6 % территории (Пастухов и др., 2016) и функционируют исключительно в условиях экосистемной защиты бугристых болот.

7.3. Статистический анализ климатических условий формирования температурных режимов почв

Мультирегрессионный анализ климатических предикторов среднегодовой температуры почв апробирован при исследовании особенностей пространственной дифференциации температурных режимов почв (Каверин и др., 2020). В качестве климатических предикторов использованы данные биоклиматической матрицы высокого пространственного разрешения WorldClim 1.0 (Hijmans et al., 2005), содержащей среднемесячные значения температуры воздуха и осадков для территории исследований. В результате статистического сравнения климатических предикторов со среднегодовыми температурами 23 почвенных профилей рассчитано уравнение множественной регрессии (2): $T_{50}=0,3344 \cdot P_{I+II}-0,04299 \cdot (P_{VII}-P_{VII-CP})^2-0,4455 \cdot \text{torf} \cdot T_{IX}+0,08531 \cdot (P_{IX}-P_{IX-CP})^2-15,11$ (2); $R^2=0,63$, $p<10^{-3}$. Верификация модели проведена методом кросс-валидации Аллена (Montgomery, Peck, 1980) с использованием критерия деградации Degr, при его значении $<50\%$ (Шарый, Пинский, 2013). Ошибка в уравнении для T_{50} составляет $0,34\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наиболее значимым климатическим предиктором $T_{ПГОД}$ глубин 0, 20, 50 и 100 см является сумма осадков января и февраля (P_{I+II}), подтверждая значимое влияние зимнего климата. Тесная положительная корреляционная связь объясняется теплоизолирующим эффектом снежного покрова зимой, дифференцирующим температурные и мерзлотные условия почв (Romanovsky et al., 2010). Даже незначительные изменения норм осадков зимних месяцев заметно влияют на значения $T_{ПГОД}$ всех глубин, поднимая их от $+0,8$ до $+1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в торфяных почвах и от $+3,1$ до $+3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в минеральных.

Вторым по значимости климатическим предиктором является значение централизованного квадрата суммы осадков июля $(P_{VII}-P_{VII-CP})^2$ – месяца с наиболее высокими температурами и осадками. При $P_{VII}=59,2\pm 6,5$ мм значения $T_{ПГОД}$ максимальны. Отрицательная корреляционная связь $T_{ПГОД}$ с $(P_{VII}-P_{VII-CP})^2$ объясняется снижением температуры почв при количестве осадков как больше, так и меньше осредненной по всем точкам июльской нормы (P_{VII-CP}). Уменьшение $T_{ПГОД}$ при снижении июльских осадков относительно нормы связано с падением температуропроводности и, соответственно, со снижением прогревания менее влажных почв. Максимальные коэффициенты температуропроводности почв различного гранулометрического состава снижаются с $6,7\pm 1,0 \cdot 10^{-7}$ м²/с до $3,1\pm 1,4 \cdot 10^{-7}$ м²/с при падении объемной влажности от 100 до 0 % (Лукьященко, 2012). Увеличение осадков в июле, в свою очередь, обуславливает и повышенное испарение. Корреляционная связь $T_{ПГОД}$ с предиктором $(P_{IX}-P_{IX-CP})^2$, напротив, положительна. При суммах сентябрьских осадков меньше многолетней нормы почва становится суше, ее температуропроводность и последующее зимнее охлаждение

уменьшаются, значения $T_{\text{Год}}$ увеличиваются. Если значения R_{IX} выше нормы, увеличение температуропроводности влажных почв способствует продолжению проникновения тепловой волны вглубь профиля почв (Бабаев и др., 1987). Корреляционная связь $T_{\text{Год}}$ с предиктором ($\text{torf} \cdot T_{\text{IX}}$) отрицательна в связи с введением независимой переменной torf , дифференцирующей почвы на торфяные ($\text{torf}=1$) и минеральные ($\text{torf}=0$) (Montgomery, Peck, 1982). Использование параметра $\text{torf} \cdot T_{\text{IX}}$ вместо T_{IX} снижает коэффициент детерминации R^2 с 0,63 до 0,47.

Применение множественных регрессионных моделей показало, что в течение нынешнего десятилетия не стоит ожидать значительных изменений температурных показателей (Каверин и др., 2020). Торфяные почвы характеризуются наибольшей температурной устойчивостью, их реакция на изменение климатических показателей в 1,5-2 раза ниже таковой минеральных почв. Экосистемная защита мерзлотных почв бугристых болот обусловлена особенностями их зимних и летних температур. Зимой температурный режим мерзлотных почв бугристых болот больше обусловлен климатическими факторами: при малой высоте снежного покрова и повышенной температуропроводности мерзлого торфа почвы сильно охлаждаются. Летом талые торфяные горизонты становятся эффективным теплоизолятором, формируя экосистемную защиту мерзлотных почв (Каверин и др., 2018).

7.4. Климатические и ландшафтные факторы глубины сезонного протаивания почв бугристых болот (лесотундра с прерывистым распространением ММП)

Исследования почв бугристых болот, проведенные в 2013-2017 гг. показали, что средняя многолетняя мощность СТС в пределах площадки 5Тм значительно дифференцирована (Рисунок 8), что обусловлено неоднородностью элементов рельефа болота (осоково-сфагновые мочажины – 7 % площади, торфяные бугры – 93 %, в том числе оголенные торфяные пятна – 48 %) (Каверин и др., 2019). Оголенные торфяные пятна, по сравнению с кустарничково-моховыми участками бугров, характеризуются полным или частичным отсутствием растительного покрова (3 ± 7 см), относительно высоким положением в рельефе (236 ± 63 см), меньшей высотой элементов микрорельефа (9 ± 4 см) и снежного покрова (22 ± 17 см), повышенными температурой ($4,8 \pm 0,6$ °С), влажностью почв (38 ± 16 %) и мощностью СТС (53 ± 6 см). Пятна развиты преимущественно в верхних частях торфяных бугров, подверженных ветровой абразии, снеговой корразии и поверхностным криогенным процессам (Каверин и др., 2016). Мочажины характеризуются относительно низким положением в рельефе (166 ± 23 см), интенсивным снегонакоплением (91 ± 14 см), высокой влажностью (100 ± 0 %) и температурой почв ($7,2 \pm 1,3$ °С), что обуславливает максимальные величины мощности СТС (139 ± 16 см).

В пределах площадки мощность СТС значимо коррелирует с температурой почв на глубинах 20 см ($R=0,56$), 50 см ($R=0,92$) и влажностью верхнего горизонта (0-10 см) почв ($R=0,59$). Высота растительности коррелирует с высотой элементов микрорельефа ($R=0,68$) и снежного покрова ($R=0,77$), определяющимся относительной высотой поверхности ($R=-0,84$). Согласно моделям множественной регрессии, на участках торфяных бугров с кустарничковой растительностью основной вклад в дифференциацию мощности СТС вносят высота поверхности (16 %) и влажность почв (18 %), на оголенных торфяных пятнах - высота снежного покрова (21 %) и микрорельеф (18 %).

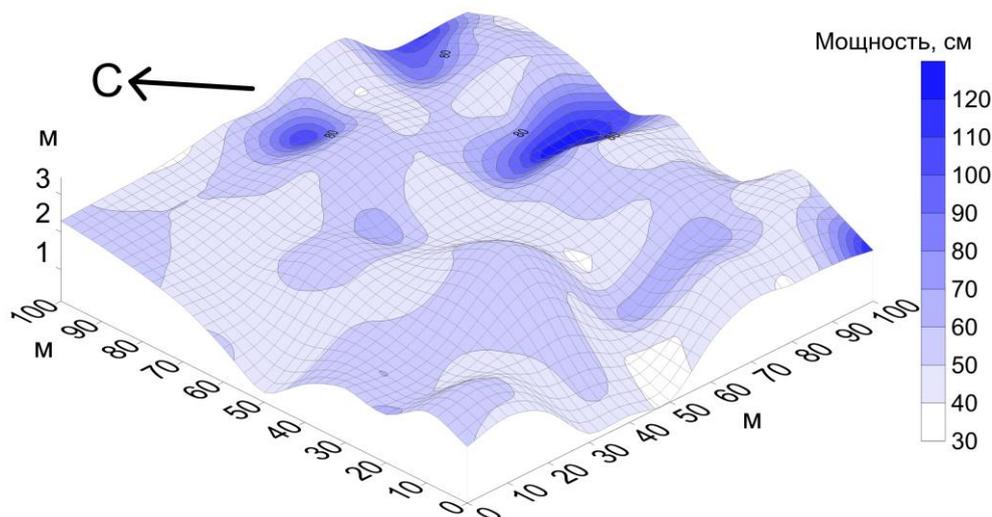


Рисунок 8 – Пространственная дифференциация средней за 2013-2017 гг. глубины сезонного протаивания (см) на площадке 5Тм (р-н 5).

Динамика средней по площадке глубины сезонного протаивания в период исследований характеризовалась слабым положительным трендом ($R^2=0,31$), на участках осоково-сфагновых мочажин ($R^2=0,40$), оголенных пятен бугров ($R^2=0,33$), кустарничково-моховой растительности торфяных бугров ($R^2=0,26$). Вариация мощности СТС согласуются с изменениями $T_{\text{Год}}$ ($R^2=0,91$), СПТ ($R^2=0,73$), СОТ ($R^2=0,63$), F ($R^2=0,90$). На участке бугристого болота среднее значение индекса морозности воздуха F за период исследований составило 0,56, что ниже среднего показателя фонового (1960-1990 гг.) периода (0,63). Несмотря на существенное смягчение климатических условий, резкого протаивания бугристых болот, где преобладают КО+ЭЗ мерзлотные почвы, не происходит.

7.5. Климатические и ландшафтные факторы глубины сезонного протаивания глеевых почв (южная тундра с прерывистым распространением ММП)

Исследованы особенности многолетних изменений мощности СТС глеевых мерзлотных почв, большая часть которых представлена климатически-обусловленными (в том числе с частичной экосистемной защитой) профилями, на мониторинговой площадке 4ГТ в 1999-2015 гг. (Каверин и др., 2017). В 2015 г. средняя по площадке глубина сезонного протаивания составила 139 % (89 см) от значения 1999 г – 64 см (Рисунок 9). С 1999 г. по 2015 г. доля почв с мощностью СТС более 1 м на площадке увеличилась с 1 до 17 %. Наиболее высокие, осредненные по всем пикетам площадки, коэффициенты корреляции ($R=0,4\pm 0,2$) выявлены между глубиной сезонного протаивания и климатическими характеристиками ($T_{\text{Год}}$, СОТ, P^w). По мультирегрессионному анализу вклад СОТ объясняет 30 %, а P^w – 12 % межгодовой вариации мощности сезонноталого слоя.

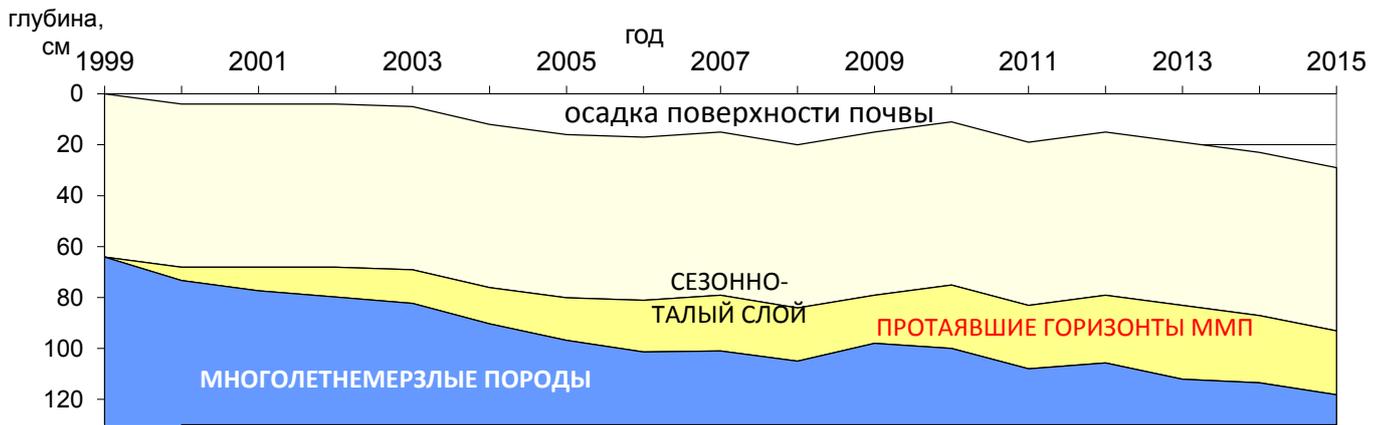


Рисунок 9 – Межгодовая динамика мощности СТС, поверхности почв и кровли многолетнемерзлых пород на площадке 4Гт (р-н 4).

Среди ландшафтных факторов наибольшее влияние на пространственную дифференциацию глубины сезонного протаивания оказывает мощность торфяного горизонта почв ($R=-0,4\pm 0,04$, доля объясненной дисперсии $24\pm 1\%$). Слабые корреляционные связи выявлены с влажностью почв ($R=0,2\pm 0,2$; $11\pm 2\%$), абсолютной высотой поверхности ($R=-0,2\pm 0,2$; $5\pm 1\%$), мезорельефом ($R=-0,2\pm 0,2$; $8\pm 2\%$), высотой мохового яруса ($R=-0,2\pm 0,2$; $2\pm 0\%$). Статистический анализ показал адекватность линейных регрессионных моделей ($F=2,56-7,04$, $p<0,05$; $R^2 = 37-59\%$). Увеличение глубины сезонного протаивания сопровождалось повышением температуры почв, статистическая взаимосвязь выявлены между $T_{\text{ПГОД}}$ и СТС ($R=0,9\pm 0,0$). В 1999-2015 гг. общий диапазон $T_{\text{ПГОД}}$ профиля 4Гт на глубине 50 см составил $+1,3\dots-3,4\text{ }^\circ\text{C}$ с положительным трендом ($R^2=0,8$). Более высокие темпы протаивания наблюдаются на участках с меньшей мощностью торфа (КО), тогда как полугидроморфные мерзлотные почвы (КО³³) показали большую устойчивость к протаиванию.

Увеличение глубины сезонного протаивания сопровождается изменениями поверхности мерзлотных почв (Мажитова, Каверин, 2007) и конфигурация кровли ММП (Лупачев и др., 2016). Подробные исследования изменений поверхности мерзлотных почв проводились в период интенсивного увеличения мощности СТС (1999-2006 гг.). В 1999-2015 гг. кровля ММП опустилась на 38 ± 16 см, обусловив осадку поверхности почв на 18 ± 9 см. Конфигурация кровли ММП в основном повторяет рельеф дневной поверхности, но с большей амплитудой высотных отметок ($+20\%$). Величина осадки практически пропорциональна мощности оттаявшего слоя ММП ($R^2=0,78$, $p<0,001$). Льдистость оттаявшего верхнего горизонта ММП определили расчетом отношения величины опускания кровли ММП к таковой осадки - $48\pm 1\%$, что соответствует величине объемной льдистости данного слоя (40-50%), определенной при бурении профиля 4Гт. Данные высокольдистые горизонты являются переходным слоем, составляющим часть экосистемной защиты мерзлотных почв от резкого протаивания (Шур, 1988).

На региональном уровне оценку сезонных изменений высоты поверхности почв проводили с использованием спутниковой радиолокационной дифференциальной интерферометрии (РДИ) в летний период (Елсаков и др., 2021). Установлено, что мерзлотные почвы не испытывают значительных изменений поверхности, тогда как летняя осадка поверхности в основном характерна для сезоннопромерзающих почв. Очевидно, это связано с

меньшей глубиной промерзания мерзлотных почв, мощность сезонномерзлого слоя которых ограничена подстилающей кровлей ММП.

7.6. Ландшафтные факторы глубины сезонного протаивания почв типичной тундры со сплошным распространением ММП

Для оценки влияния ландшафтных изменений на мерзлотные почвы в подзоне их сплошного распространения проанализированы взаимосвязи компонентов почвенно-растительного покрова с глубиной сезонного протаивания (Каверин и др., 2016). В р-не исследований 1 выделено семь основных типов растительных сообществ с соответствующими им ландшафтными компонентами и типами почв. Наибольшая глубина сезонного протаивания (70-90 см) определена в климатически-обусловленных автоморфных глееземах (1Гтп, 1Гп), функционирующих в осоково-кустарничково-моховых и травяно-кустарничково-мохово-лишайниковых тундрах. Для глееземов и торфяно-глееземов мерзлотных (1Гпг), развитых в депрессиях рельефа, характерны меньшие глубины протаивания: для суглинистых – 44 ± 8 см, песчаных – 74 ± 27 см. Наименьшая глубина сезонного протаивания (30 см) выявлена в понижениях рельефа с суглинистыми торфяно-глееземами мерзлотными (1Гтм), что ожидаемо для климатически-обусловленных мерзлотных почв с частичной экосистемной защитой.

На мерзлотных почвах с кровлей ММП в диапазоне 1-2 м широко развиты редкоивняковые тундры. В торфяно-глееземах (1Гт) склонов увалов и понижений озерных котловин глубина залегания кровли ММП опускается до 1,5 м в суглинистых почвах и до 2 м в почвах легкого гранулометрического состава. Для почв с глубиной залегания ММП более 2 м характерны преимущественно крупноивняковые и луговые сообщества. Глееземы криогенно-ожелезненные и торфяно-глееземы (1Гж) здесь развиты в плоских межувалистых понижениях, нижних частях склонов, вдоль водотоков и по берегам озер. Серогумусовые глеевые почвы (1Гг) сформировались на плакорах под разнотравно-осоково-моховыми лугами.

В условиях низкорослой тундровой растительности (1Гтп, 1Гп, 1Гпг, 1Гтм) органогенный горизонт обуславливает частичную экосистемную защиту климатически-обусловленных мерзлотных почв от протаивания. В мерзлотных почвах кустарничково-мохово-лишайниковых сообществ ($n=15$) и осоково-моховых болот ($n=17$) глубина сезонного протаивания обратно пропорциональна мощности органогенного горизонта почв ($R=-0,6$, $p<0,05$). Влияние органогенного горизонта, как фактора экосистемной защиты, снижается (3 %) в почвах с крупнокустарниковой растительностью (1Гт, 1Гж), где ММП отсутствует, либо залегает на глубине более 1 м. В почвах ивняковых тундр ($n=18$) основным фактором, определяющим глубину протаивания, является высота яруса кустарникового яруса ($r=0,72$, $p<0,05$; 46 % по модели множественной регрессии).

Глава 8. Температурные режимы почв: классификационный анализ и географические закономерности

8.1. Классификационный анализ температурных режимов почв естественных геосистем

При всем многообразии рассмотренных температурных режимов почв тундровых и лесных геосистем возникает необходимость их сравнительного анализа. В связи с этим, температурные режимы почв естественных геосистем рассмотрены в рамках наиболее

используемых классификаций: авторской (Димо, 1972) и американской (Key to Soil Taxonomy, 2014). Классификация Димо (1972) основана на данных о температуре на глубине 20 см, преимущественно отражая влияние на почвы поверхностных условий: температуры воздуха, высоты снежного покрова, характера растительности и других.

Согласно классификации Димо (1972) по среднегодовой температуре мерзлотные почвы тундровых геосистем, включая бугристые болота, определены в рамках длительно сезоннопромерзающего типа температурного режима. По зимнему температурному режиму к мерзлотному типу относятся преимущественно КО и КО+ЭЗ мерзлотные почвы, в рамках длительно сезоннопромерзающего типа определяются ЭЗ почвы торфяных бугров и почвы мочажин. Сезоннопромерзающие почвы тундровых и лесных геосистем по зимним параметрам классифицируются как сезоннопромерзающий тип температурного режима. По летним показателям сезоннопромерзающие и мерзлотные (КО, КО+ЭЗ, КО^{ЭЗ}) почвы тундры определены в мерзлотном, длительно сезоннопромерзающем и сезоннопромерзающем типах, почвы лесных геосистем и мочажин бугристых болот классифицируются в рамках сезоннопромерзающего типа. Соответственно, при классификации температурных режимов почв в системе Димо (1972) возникают сложности, связанные с отсутствием ряда температурных диапазонов, необходимых для выделения относительно теплых мерзлотных и сезоннопромерзающих почв, характерных для европейского Севера.

Классификационный анализ показал, что при выделении мерзлотных почв в Канинско-Печорской провинции в рамках мерзлотного типа со значениями $T_{\text{Год}}$ от 0 до -4 °С необходимо добавить холодный ($\text{СОТ}_{\text{п}}$ $-1000 \dots -1500$ °С·сут, $T_{\text{мин}}$ $-8 \dots -12$ °С) и умеренно холодный подтипы ($\text{СОТ}_{\text{п}}$ $-500 \dots -1000$ °С·сут; $T_{\text{мин}}$ $4 \dots -8$ °С). Для выделения группы мерзлотных почв с протаивающими ММП (КО, КО^{ЭЗ}) в классификацию целесообразно добавить комбинацию: $T_{\text{Год}}$ $0 \dots +2$ °С, $\text{СОТ}_{\text{п}}$ $0 \dots -500$ °С·сут, $T_{\text{мин}}$ $0 \dots -4$ °С. Для сезоннопромерзающих почв тундры в рамках сезоннопромерзающего типа с диапазонами $\text{СПТ}_{\text{п}}$ $+500 \dots +1000$ °С·сут необходимо добавить холодный и очень холодный подтипы со значениями $\text{СОТ}_{\text{п}}$ $-0 \dots -500$ и $-500 \dots -1000$ °С·сут соответственно. Для классификации почв северной тайги в рамках сезоннопромерзающего типа необходимо дополнительно выделить умеренно холодный подтип с диапазонами $\text{СПТ}_{\text{п}}$ $+0 \dots +500$ °С·сут и средней температурой самого теплого месяца $+8 \dots +12$ °С.

Разрешение классификации температурных режимов почв Димо (1972) применительно к региону исследований выше, чем Таксономии почв (2014), где мерзлотные почвы тундры характеризуются режимом Subgelic, сезоннопромерзающие почвы тундры и тайги – преимущественно режимом Cryic. Тем не менее, американская система использует температуру на глубине 50 см, отражая влияние внутрипочвенных условий на температуру почв, что особенно актуально при сопоставлении влияния климатических и ландшафтных факторов.

8.2. Разработка и апробация компоненты классификации температурных режимов почв

Несмотря на применимость к обширным территориям, рассмотренные классификационные системы (Димо, 1972; Soil Taxonomy, 2014) не в полной мере раскрывают особенности пространственной дифференциации температурных режимов и геоэкологических условий функционирования почв европейского северо-востока России. Шаг классификации

Димо (1972) в 4 °С позволяет отделить мерзлотные почвы от сезоннопромерзающих, без отражения ландшафтных различий. Для выделения специфики температурных режимов почв необходимо уменьшить шаг среднегодовой температуры почв до 2 °С, что позволит разделить относительно теплые и холодные как мерзлотные, так и сезоннопромерзающие профили.

Для характеристики среднегодовой температуры почв в регионе с криолитозоной целесообразно использовать глубину 50 см. Среднегодовые температуры на глубине 50 см лучше отражают глубину залегания кровли ММП. Наиболее холодные торфяные мерзлотные почвы бугристых болот ($T_{\text{ПГОД}} = -4 \dots -2$ °С) характеризуются глубиной подстилания ММП, близкой к 50 см (подглавы 5.1, 5.3, 6.2, 6.3), тогда как почвы с глубиной подстилания ММП в 1 м и более, как правило, имеют более высокие значения $T_{\text{ПГОД}}$ ($-2 \dots 0$ °С). В сезоннопромерзающих почвах тундровых и лесных геосистем на глубине 50 см наблюдаются значимые различия ($p < 0,05$) по летним и зимним температурным характеристикам (подглавы 5.2, 5.4). Максимальная глубина суточных теплооборотов исследуемых почв в целом соответствует 50 см при значениях S , снижающихся здесь до $\pm 0,03$ °С. Использование шага в 2 °С обусловлено относительно узким ($-4,6 \dots +4$ °С) суммарным диапазоном $T_{\text{ПГОД}}$ исследуемых почв на глубине 50 см. Средняя разница при сравнении среднегодовых температур почв естественных геосистем обычно составляет не более 2 °С со стандартными отклонениями от $\pm 0,1$ °С до $\pm 0,3$ °С (подглавы 5.1, 5.2, 5.4).

В условиях значительной пространственной дифференциации мерзлотных условий критерий наличия многолетней мерзлоты, принятый в Soil Taxonomy (2014) недостаточен. В условиях несплошного распространения многолетнемерзлых пород в профиле почв необходимо выделять различные глубины подстилания кровли ММП, включая заглубленное ее положение (1-2 м и более). Проблемы современного классификационного положения мерзлотных почв в различных таксономических системах освящена С.В. Горячкиным с соавторами (Goryachkin et al., 2019). Предложено расширение понимания подтипа «мерзлотный», приравняв его к международным стандартам (Soil Classification, 1998; IUSS, 2014; Soil Taxonomy, 2014), ввести виды подтипа «мерзлотный» мелко-, средне- и глубокомерзлотные для почв с проявлением криогенных процессов и смыкающейся мерзлотой на глубине 1, 2 метров и глубже 2 метров соответственно. Исследованные мерзлотные почвы в большей степени различаются по зимним температурным параметрам (Каверин и др., 2014), поэтому необходимо знание не только глубины сезонного протаивания, но и сезонного промерзания. Данные глубин сезонного промерзания позволяют судить о сливающимся или нессливающимся типе мерзлоты, а в условиях отсутствия ММП становятся единственным мерзлотным классификационным критерием. Сочетание предложенных классификационных критериев позволяет эффективно дифференцировать температурные режимы мерзлотных и сезоннопромерзающих почв, функционирующих в тундровых и лесных геосистем региона с различными геохронологическими условиями.

На основании результатов классификационного анализа температурных режимов исследованных почв считаем необходимым предложить температурно-мерзлотную компоненту для классификации почв, усиливающую ее режимную составляющую (Герасимова и др., 2020). Основными критериями предлагаемой классификационной компоненты являются: среднегодовая температура почв на глубине 50 см, глубина залегания кровли ММП (при

сливающейся мерзлоте соответствует мощности СТС), мощность сезонномерзлого слоя. Данная компонента, разработанная для почв субарктического сектора европейского северо-востока России, может использоваться и для прилегающих субарктических и бореальных регионов, а при расширении диапазонов классификационных критериев и для более обширных территорий. Региональные типизации почвенных температурных режимов, учитывающие широкое разнообразие почв конкретного региона, акцентируют внимание как на годовые, так и сезонные температурные показатели (Куликов и др., 1997).

В качестве классификационных критериев предложены следующие градации температурных режимов почв по значению $T_{\text{ПГОД}}$: <-2 °С (очень холодные), от -2 до 0 °С (холодные), от 0 до $+2$ °С (умеренно-холодные), от $+2$ до $+4$ °С (прохладные). Диапазоны глубины сезонного промерзания (мощности СМС): $<0,5$ м (с поверхностным сезонным промерзанием), $0,5-1$ м (с мелким сезонным промерзанием), $1-2$ м (со среднеглубинным сезонным промерзанием), >2 м (с глубоким сезонным промерзанием). Для указания глубин сливания сезонной и многолетней мерзлоты использованы термины «приповерхностно-сливающиеся» (до $0,5$ м) и «близкосливающиеся» ($0,5-1$ м). Градации глубины залегания ММП: <1 м (мелкомерзлотные), $1-2$ м (среднеглубинные мерзлотные), $2-3$ м (глубокомерзлотные), >3 м (немерзлотные). Для отображения классификационных названий почв по компоненте используется последовательность $T_{\text{ПГОД}} - \text{ММП} - \text{СМС}$. В случае обнаруженной заглубленной (>3 м) кровли ММП к классификационным названиям в скобках могут добавляться значения глубин ее залегания, к примеру (9 м). Применение классификационной компоненты позволило показать значительную дифференциацию температурных режимов и геокриологических условий функционирования исследованных почв естественных тундровых и лесных геосистем (Таблица 2).

Согласно классификационной компоненте мерзлотные почвы (подглава 5.1) геосистем южной тундры определяются в 6 различных подтипах в составе 2 типов (Таблица 2). Климатически-обусловленный профиль характеризуется среднеглубинными показателями как по залеганию ММП, так и сезонному промерзанию, подчеркивая контраст между летним и зимним температурным режимом. Холодность зимнего и летнего температурных режимов КО+ЭЗ мерзлотных почв отражается по всем трем критериям. КО^{ЭЗ} почвы характеризуется большими глубинами сезонного протаивания и относительной мягкостью температурного режима. Почвы бугров и мочажин бугристых болот кардинально различаются между собой по всем трем классификационным критериям. В ЭЗ почвах бугристых болот критерии подчеркивают относительную суровость температурного режима на фоне большей глубины сезонного протаивания в р-не 7. Сезоннопромерзающие почвы крупнокустарниковых тундр характеризуются мелким сезонным промерзанием, в отличие от профилей мохово-кустарничковых сообществ со среднеглубинным промерзанием. Классификационные отличия почв лесных геосистем отражаются на уровне подтипов по среднегодовой температуре (Таблица 2).

Для упрощения системы классификационных названий почв предложены сокращения подтипов по среднегодовой температуре: ОХ – очень холодные; Х – холодные; УХ – умеренно-холодные; П – прохладные; типов по глубине залегания ММП: ММ – мелкомерзлотные; СМ – среднеглубинные мерзлотные; ГМ – глубокомерзлотные; НМ – немерзлотные; подтипов по

глубине сезонного промерзания: ПС – приповерхностно-сливающиеся; БС – близкосливающиеся; ПСП – с поверхностным сезонным промерзанием; МСП – с мелким сезонным промерзанием; ССП – со среднеглубинным сезонным промерзанием; ГСП – с глубоким сезонным промерзанием. Для упрощения названий почв предложено использовать краткие классификационные формулы, например УХ/НМ/ПСП (Таблица 2). При отсутствии температурных исследований почв могут применяться и неполные формулы: -/ММ/МСП. В криолитозоне значительная часть полевых исследований почв проводится во второй половине лета, когда глубина сезонного протаивания не достигает максимума, наблюдаемого осенью (Каверин и др., 2016). При этом сохраняются остаточные сезонномерзлые горизонты, что должно учитываться при классификации профилей по мерзлотным критериям.

8.3. Анализ изменений температурных режимов почв антропогенно-нарушенных геосистем в рамках предложенной классификационной компоненты

Предлагаемая классификационная компонента апробирована для сравнительного анализа температурных режимов и геокриологических условий почв, функционирующих при ландшафтных изменениях, возникших при различных антропогенных воздействиях. Исследованные температурные режимы антропогенно-нарушенных почв отличаются от естественных более широким диапазоном температурных и мерзлотных условий в сравнении с естественными аналогами. Поэтому традиционные системы (Димо, 1972; Soil Taxonomy, 2014) для классификации температурных режимов антропогенно-нарушенных почв применимы в еще меньшей степени.

Сравнительный классификационный анализ показал, что прокладка зимней дороги в тундровых ландшафтах не приводит к существенным изменениям температурных и мерзлотных условий функционирования почв даже в КО профилях (Таблица 2). Сельскохозяйственное освоение тундровых участков, напротив, обуславливает значительную трансформацию ландшафтных условий, классификационные названия нарушенных почв изменяются по всем трем критериям (Таблица 2). При сельскохозяйственном освоении различных по растительному покрову тундровых геосистем (4Гт, 4Гк), сформировались климатически-обусловленные постагрогенные почвы (4Гп', 4Гк') со схожими температурно-мерзлотными условиями (УХ/СМ/ССП). Наиболее существенные изменения температурных и мерзлотных условий выявлены при строительстве насыпной автодороги с цементно-бетонным покрытием и отражаются в кардинальном изменении всех классификационных показателей (6Эг', 6Нп') относительно ненарушенных аналогов (6Тм) (Таблица 2). Климатически-обусловленный характер почвогрунтов дорожной насыпи подчеркивается относительной контрастностью классификационных критериев.

Сравнительный классификационный анализ позволяет оценить влияние кардинальных ландшафтных изменений на динамику температурных режимов и геокриологических условий функционирования почв. На основании классификационных критериев в котловине осушенного озера и прилегающей террасы по изменению температуры и мерзлотных условий выделены основные типы почв: I. Сезонноталые почвы котловины (Рисунок 6; скважины 11, 12), изменение температуры и мерзлотных условий их функционирования выражается классификационной формулой УХ/НМ/МСП – П/НМ/МСП; II. Почвы котловины с

глубокозалегающими ММП (скважины 3, 13), классификационная формула: П/НМ(10 м)/МСП – П/НМ(10-15 м)/МСП; III. Почвы котловины с нестабильными ММП (скважины 5, 8, 9, 10) характеризовались временным формированием климатически-обусловленных профилей: УХ/НМ/МСП – Х/ММ/БС – УХ/НМ/МСП; IV. Почвы котловины со стабильными ММП (скважины 4, 6, 7) по мерзлотным условиям отражают трансформацию КО в КО+ЭЗ профили: УХ/НМ/МСП – Х/ММ/БС.

Анализ изменений температурного режима и геокриологических условий функционирования почв при антропогенных нарушениях предопределяет введение понятия устойчивости температурных режимов почв. В рамках предложенной компоненты предлагается считать почвы температурно устойчивыми, если климатические и/или ландшафтные изменения привели к многолетнему изменению двух из трех классификационных названий: и температурного и мерзлотного. Например, повышение среднегодовой температуры почвы привело к классификационно значимому опусканию кровли ММП или уменьшению глубины сезонного промерзания.

Оценка устойчивости температурных режимов почв в рамках классификационной компоненты позволяет анализировать условия функционирования мерзлотных почв, существование которых обусловлено влиянием климатических и/или ландшафтных факторов. Изменения классификационных показателей почв, наблюдаемые при антропогенных воздействиях, обусловлены нарушением экосистемной защиты мерзлотных почв от протаивания. Мерзлотные почвы проявляют температурную неустойчивость в условиях сельскохозяйственной нагрузки и при строительстве насыпных автодорог. В осушенной котловине озера дифференцированные ландшафтные изменения обусловили формирование как устойчивых, так и неустойчивых к протаиванию мерзлотных почв.

Климатически-обусловленные мерзлотные почвы остаются относительно устойчивыми к протаиванию в условиях слабой антропогенной нагрузки, наблюдаемой при прокладке зимних дорог. В целом, согласно классификационным критериям определена устойчивость температурных режимов КО+ЭЗ мерзлотных почв. Тогда как климатически-обусловленные мерзлотные почвы становятся температурно неустойчивыми в условиях современных климатических изменений.

8.4. Географические закономерности температурного режима почв

Использование различных методических подходов в физической географии позволяет оценить влияние климатических и ландшафтных условий на пространственно-временную дифференциацию температурных режимов почв на ландшафтном и региональном уровнях. Использование предложенной классификационной компоненты (подглава 8.2) способствует анализу пространственной дифференциации температурных режимов и мерзлотных условий функционирования почв на ландшафтном и региональном уровнях. Классификационные критерии универсально применимы при оценке температурных и мерзлотных характеристик почв, функционирующих в условиях климатических и ландшафтных изменений (подглава 8.3). На основе количественных показателей классификационных критериев обоснована оценка температурной устойчивости почв. Комплексное использование примененных в работе методов (геоинформационных, статистических и других) наряду с мониторинговыми исследованиями

температуры и глубины сезонного протаивания почв позволяет анализировать пространственную дифференциацию сезоннопромерзающих и мерзлотных почв с учетом их температурной устойчивости (главы 5, 6, 7).

Торфяные мелкомерзлотные почвы характеризуются повышенной температурной устойчивостью к многолетнему протаиванию при изменении климата, функционируя преимущественно в условиях экосистемной защиты бугристых болот (КО+ЭЗ; ЭЗ) (подглава 7.4). Глеевые (ММ, СМ, ГМ) почвы, характеризуясь меньшей устойчивостью температурных режимов (КО, КО^{ЭЗ}), в большей мере подвержены протаиванию при современном потеплении в регионе. На мониторинговой площадке 4Гт на фоне многолетнего повышения среднегодовой температуры почв доля среднеглубинных мерзлотных почв с 1999 по 2015 гг. увеличилась с 1 до 17 % за счет сокращения площади мелкомерзлотных профилей (подглава 7.5). Наряду со значительным опусканием кровли ММП, почвы из подтипа холодных перешли в умеренно-холодные, что свидетельствует о неустойчивости их температурных режимов согласно критериям предложенной классификационной компоненты. Высокие коррелятивные связи температуры и глубины сезонного протаивания глеевых мерзлотных почв подчеркивают климатически-обусловленный характер их существования. Частичная экосистемная защита глеевых мерзлотных почв от протаивания объясняется присутствием органогенного горизонта повышенной мощности (> 10 см) и/или наличием высокольдистого (40-50 %) переходного слоя (подглава 7.5). Климатически-обусловленные мерзлотные почвы (КО; КО^{ЭЗ}) характеризуются широким диапазоном глубины подстилания многолетнемерзлыми горизонтами (ММ, СМ, ГМ). Температурно устойчивые почвы с экосистемной защитой (КО+ЭЗ; ЭЗ) в большей мере характеризуются как мелкомерзлотные профили, где не наблюдается значимых изменений названий по классификационным критериям при климатических флуктуациях.

Комбинирование геоинформационных и статистических методов исследований в рамках предложенной классификационной компоненты позволяет анализировать влияние как климатических, так и ландшафтных факторов на пространственную дифференциацию мерзлотных и температурных условий функционирования почв на региональном уровне. Расчеты показали что, несмотря на высокую относительную долю климатически-обусловленных профилей среди мерзлотных почв региона (83%) их общая доля в структуре почвенного покрова снижается с 90-100 % в подзоне сплошного распространения ММП до 20 % и ниже в подзонах несплошного распространения (Рисунок 10).

На этом фоне, к югу возрастает относительная доля экосистемно-защищенных почв от 0-9 % в условиях сплошного распространения ММП до 90-100 % при их редкоостровном распространении. Общая доля экосистемно-защищенных мерзлотных почв характеризуется максимумом (21-25 %) в подзонах прерывистого и массивно-островного распространения ММП в центральной части тундрово-таежного экотона. Геоинформационный анализ почвенного покрова центральной части регионального экотона показал, что общая доля экосистемно-защищенных мерзлотных почв близка к данному показателю, учитывая, что только доля мелкомерзлотных профилей достигает 18 % (подглава 6.3).

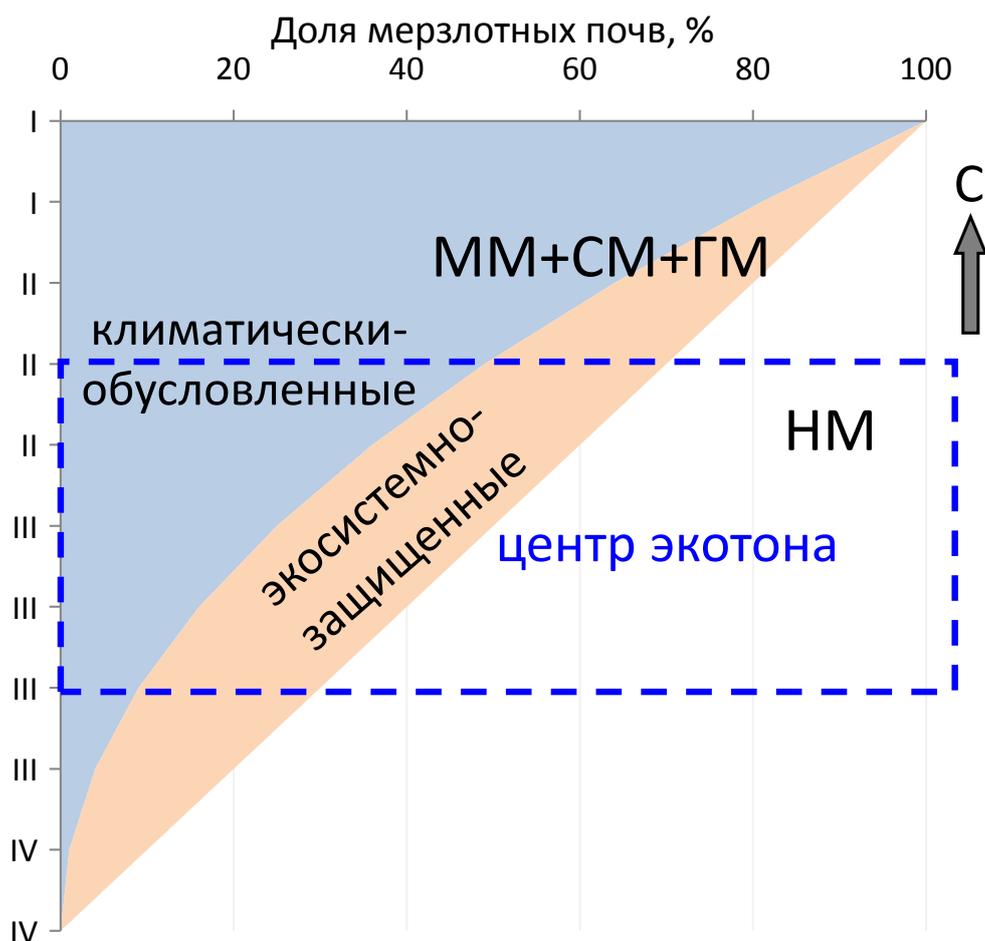


Рисунок 10 – Географические закономерности температурного режима почв. Подзоны распространения ММП: I – сплошного; II – прерывистого; III – массивно-островного; IV – редкоостровного. Названия типов почв по предложенной компоненте: MM – мелкомерзлотные; CM – среднеглубинные мерзлотные; GM – глубокомерзлотные; HM – немерзлотные.

В центральной полосе тундрово-таежного экотона около 13% занято климатически-обусловленными мерзлотными (MM+CM+GM) почвами. Климатически-обусловленные почвы с частичной экосистемной защитой, включающие преимущественно полугидроморфные профили (MM+CM), занимают 26 % данной территории. К югу и северу от центральной полосы экотона, общая доля экосистемно-защищенных мерзлотных почв снижается, что подтверждается результатами геоинформационного анализа структуры почвенного покрова в подзонах сплошного и редкоостровного распространения ММП (подглава 6.3).

Таким образом, комплексные исследования температурного режима почв определили, что в структуре почвенного покрова региона на фоне постепенного снижения относительной площади мерзлотных почв к югу возрастает доля экосистемно-защищенных температурно устойчивых профилей. Соответственно, прогнозируемое изменение климата в субарктическом секторе европейского северо-востока России приведет лишь к частичному протаиванию мерзлотных почв, затронув преимущественно климатически-обусловленные профили.

Выводы

1. Пространственная дифференциация температурных режимов почв естественных геосистем Субарктики европейского северо-востока России на региональном уровне на 66 % зависит от температуры воздуха и осадков теплого периода года, на ландшафтном уровне – от рельефа и растительного покрова. Географическая зональность мерзлотных почв региона до 83 % определяется климатическими характеристиками с низкими коэффициентами вариации вдоль почвенно-геокриологических границ ($Kvar=0-4$): индексами морозности воздуха и сухости, суммой положительных температур воздуха и среднегодовым количеством осадков.

2. Климатические условия, обеспечивающие существование мерзлотных почв в регионе, ухудшились: среднерегionalный индекс морозности воздуха в 1960-2010-е гг. снизился с $0,60 \pm 0,01$ до $0,57 \pm 0,01$ при повышении среднегодовой температуры воздуха с $-4,2 \pm 0,6$ °C до $-2,8 \pm 0,6$ °C. Потепление обусловило многолетнее увеличение температуры (с трендом $R^2=0,5$; $p<0,05$) и глубины сезонного протаивания ($R^2=0,9$; $p<0,05$) минеральных мерзлотных почв, существование которых в большей степени зависит от климатических условий. Торфяные мерзлотные почвы по температуре и глубине сезонного протаивания ($R^2=0,3$; $p<0,05$) в меньшей степени реагируют на климатические изменения, находясь в условиях экосистемной защиты болотных геосистем.

3. В климатически-обусловленных мерзлотных почвах, характеризующихся широким разнообразием температурных режимов ($T_{п\text{год}}=-2...+2$ °C), частичную экосистемную защиту от протаивания обеспечивает комплекс ландшафтных факторов. Мощность сезонноталого слоя глеевых почв снижается ($p<0,05$) при уменьшении высоты кустарникового ($R=0,9$) и травяного ($R=0,7$) ярусов, увеличении мощности торфяного горизонта ($R=-0,4$). В экосистемно-защищенных мерзлотных почвах бугристых болот с относительно холодным температурным режимом ($T_{п\text{год}}=-4...-1$ °C) глубина сезонного протаивания определяется влажностью (вклад фактора по мультирегрессионному анализу – 18 %) и относительной высотой поверхности почв (16 %) под мохово-кустарничковой растительностью, высотой снежного покрова (21 %) и элементов микрорельефа (18 %) – при отсутствии растительного покрова.

4. Антропогенные воздействия, сопровождающиеся трансформацией растительного покрова и верхних (0-20 см) почвенных горизонтов, приводят к дифференцированным изменениям температурных режимов климатически-обусловленных мерзлотных почв. Среднегодовая температура и глубина сезонного протаивания почв уменьшаются ($p<0,05$) при разрушении крупнокустарничковой растительности, обуславливающим усиление зимнего охлаждения профиля при снижении снегонакопления ($p<0,05$), и увеличиваются ($p<0,05$) в почвах мохово-кустарничковых тундр, более чувствительных к нарушениям поверхностного органогенного горизонта. Антропогенная трансформация тундровых геосистем, сопровождающаяся кардинальными изменениями почвенно-растительного покрова, приводит к значительному повышению ($p<0,001$) летних и зимних температур экосистемно-защищенных мерзлотных почв, обуславливая их глубокое (до 2 м и более) протаивание.

5. Разработана классификационная температурно-мерзлотная компонента, позволяющая эффективно дифференцировать температурные режимы и мерзлотные условия функционирования почв субарктического региона с высокотемпературной криолитозоной.

Определены значимые для функционирования региональных почв количественные классификационные критерии: среднегодовая температура (шаг 2 °С) на глубине 50 см, глубина сезонного промерзания (0,5; 1; 2 м) и протаивания (0,5; 1; 2; 3 м) почв. Предложено определение устойчивости температурных режимов почв, при которой многолетние климатические и ландшафтные тренды не приводят к классификационно значимому изменению среднегодовой температуры и глубины сезонного протаивания и/или промерзания почв.

6. Применение геоинформационных и статистических методов исследований в комплексе с предложенной классификационной компонентой позволило выявить относительную устойчивость температурных режимов почв субарктического сектора европейского северо-востока России, функционирующих в условиях современных климатических и ландшафтных изменений. Общая доля экосистемно-защищенных (преимущественно мелкомерзлотных) почв с устойчивыми температурными режимами достигает 25 % в центральной части тундрово-таежного экотона при несплошном (10-90 %) распространении многолетнемерзлых пород. Доля климатически-обусловленных мерзлотных почв, характеризующихся слабой температурной устойчивостью и широким диапазоном глубины сезонного протаивания (1-3 м), снижается с 90 % в сплошной (100 %) криолитозоне до 0 % при редкоостровном (≤ 20 %) распространении многолетнемерзлых пород. Среди климатических обусловленных профилей большая часть (до 70 %) приходится на долю полугидроморфных мерзлотных почв, где органогенный горизонт мощностью 10-40 см обуславливает их частичную экосистемную защиту от протаивания.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, индексируемых в WoS и Scopus:

1. Мажитова, Г. Г. Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России / Г. Г. Мажитова, **Д. А. Каверин** // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 4. – С. 20–30.
2. Hugelius, G. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic / G. Hugelius, T. Virtanen, **D. Kaverin**, A. Pastukhov, F. Rivkin, S. Marchenko, V. Romanovsky, P. Kuhry // Journal of Geophysical Research-Biogeosciences. – 2011. – Vol. 116. – is. G3. – G03024. – 14 p. – DOI: 10.1029/2010JG001606.
3. **Каверин, Д. А.** Составление крупномасштабных почвенных карт ключевых участков в тундре и лесотундре северо-востока европейской России / Д. А. Каверин, О. В. Шахтарова, А. В. Пастухов, Г. Г. Мажитова, Е. М. Лаптева // География и природные ресурсы. – 2012. – № 3. – С. 140–146.
4. **Каверин, Д. А.** Температурный режим тундровых почв и подстилающих многолетнемерзлых пород (европейский северо-восток России) / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, Г. Г. Мажитова // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII, № 3. – С. 23–32.
5. Пастухов, А. В. Экологическое состояние мерзлотных бугристых торфяников на северо-востоке европейской России / А. В. Пастухов, **Д. А. Каверин** // Экология. – 2016. – № 2. – С. 94–102. – DOI: 10.7868/S0367059716010108.

6. **Каверин, Д. А.** Влияние растительного покрова на глубину сезонного протаивания в тундровых почвах предгорных ландшафтов кряжа Пай-Хой (юго-запад Югорского полуострова) / Д.А. Каверин, Е.Е. Кулюгина, О.В. Шахтарова, В.М. Щанов // Криосфера земли. – 2016. – Т. XX, № 4. – С. 69–78.
7. Пастухов, А. В. Генезис и эволюция бугристых болот на территории редкоостровной многолетней мерзлоты на европейском Северо-Востоке (бассейн среднего течения р. Косью) / А. В. Пастухов, Т. И. Марченко-Вагапова, **Д. А. Каверин**, Н. Н. Гончарова // Криосфера Земли. – 2016. – Т. XX, № 1. – С. 3–14.
8. **Каверин, Д. А.** Строение и свойства почв многолетнемерзлых торфяников юго-востока Большеземельской тундры / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, Е. М. Лаптева, К. Биазы, М. Марущак, П. Мартикайнен // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 542–556. – DOI: 10.7868/S0032180X16050075.
9. Пастухов, А. В. Построение региональных цифровых тематических карт (на примере карты запасов углерода в почвах бассейна р. Уса) / А. В. Пастухов, **Д. А. Каверин**, В. М. Щанов // Почвоведение. – 2016. – № 9. – С. 1042–1051. – DOI: 10.7868/S0032180X16090100.
10. Лупачев, А. В. Микрорельеф поверхности многолетнемерзлых пород: строение и экологические функции / А. В. Лупачев, С. В. Губин, А. А. Веремеева, **Д. А. Каверин**, А. В. Пастухов, А. С. Якимов // Криосфера Земли. – 2016. – Т. XX, № 2. – С. 3–14.
11. **Каверин, Д. А.** Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в европейской России) / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, А. Б. Новаковский // Криосфера Земли. – 2017. – Т. XXI, № 6. – С. 35–45. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(35-44).
12. **Kaverin, D. A.** Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north / D. A. Kaverin, E. B. Melnichuk, N. I. Shiklomanov, N. B. Kakunov, A. V. Pastukhov, A. N. Shiklomanov // Permafrost and Periglacial Processes. – 2017. – Vol. 29. – P. 49–59. – DOI: 10.1002/ppp.1963.
13. **Каверин, Д. А.** Высокочастотное георадиолокационное зондирование почвогрунтов многолетнемерзлых бугристых болот (европейский Северо-Восток России) / Д. А. Каверин, А. В. Хилько, А. В. Пастухов // Криосфера Земли. – 2018. – Т. XXII, № 4. – С. 86–95. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(86-95).
14. **Каверин, Д. А.** Температурное состояние почвогрунтов бугристо-мочажинных болот в зоне редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород (Европейский Северо-Восток России) / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов // Криосфера Земли. – 2018. – Т. XXII, № 5. – С. 47–56. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(47-56).
15. Treat, C. Tundra landscape heterogeneity, not inter-annual variability, controls the decadal regional carbon balance in the Western Russian Arctic / C. Treat, M. E. Marushchak, C. Voigt, Y. Zhang, Z. Tan, Q. Zhuang, T. A. Virtanen, A. Räsänen, C. Biasi, G. Hugelius, **Kaverin D.**, P. Miller, M. Stendel, V. Romanovsky, F. Rivkin, P.J. Martikainen, N.J. Shurpali // Global Change Biology. – 2018. – Vol. 24(11). – DOI: 10.1111/gcb.14421.
16. **Каверин, Д. А.** Влияние трансформации растительного и почвенного покровов на температуру почв при эксплуатации зимней дороги в Большеземельской тундре / Д. А. Каверин, Л. Э. Лапина, А. В. Пастухов, А. Б. Новаковский // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 1. –

С. 17–27. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(17-27).

17. **Каверин, Д. А.** Влияние ландшафтных и климатических факторов на глубину сезонного протаивания в почвах бугристых торфяников (на примере площадки R52) / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, А. Б. Новаковский, К. Биазы, М. Марущак, В. В. Елсаков // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 2. – С. 62–71. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(62-71).

18. **Каверин, Д. А.** Геоинформационный анализ климатических условий криолитозоны европейского северо-востока России / Д. А. Каверин, Е. М. Лаптева, В. М. Щанов, А. В. Пастухов, Л. С. Шарая, П. А. Шарый // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 4. – С. 68–78. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-4(68-78).

19. **Каверин, Д. А.** Температурный режим почв постагrogenных экосистем при активизации самовосстановительной сукцессии тундровой растительности (европейский северо-восток России) / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, А. Н. Панюков // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, № 5. – С. 58–66. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(58-66).

20. Biskaborn, B. K. Permafrost is warming at a global scale / B. K. Biskaborn, S. L. Smith, J. Noetzli, H. Matthes, G. Vieira, D.A. Streletskiy, P. Schoeneich, V.E. Romanovsky, A. G. Lewkowicz, A. Abramov, M. Allard, J. Boike, W. L. Cable, H.H. Christiansen, R. Delaloye, B. Diekmann, D. Drozdov, B. Etzelmüller, G. Grosse, M. Guglielmin, T. Ingeman-Nielsen, K. Isaksen, M. Ishikawa, M. Johansson, H. Johannsson, A. Joo, **D. Kaverin**, A. Kholodov, P. Konstantinov, T. Kröger, C. Lambiel, J. - P. Lanckman, D. Luo, G. Malkova, I. Meiklejohn, N. Moskalenko, M. Oliva, M. Phillips, M. Ramos, A. B. K. Sannel, D. Sergeev, C. Seybold, P. Skryabin, A. Vasiliev, Q. Wu, K. Yoshikawa, M. Zheleznyak, H. Lantuit // Nature Communications. – 2019. – Vol. 10, Is. 1. – P. 1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>.

21. Анисимов, О. А. Модельная ассимиляция и реанализ геокриологических данных: постановка задачи и валидация модели для Европейского Севера и Восточной Сибири / О. А. Анисимов, С. А. Лавров, А. Ф. Жирков, **Д. А. Каверин** // Метеорология и Гидрология. – 2020. – № 4. – С. 85–94.

22. **Каверин, Д. А.** Особенности современного температурного режима почвогрунтов на участке пересечения бугристого торфяника автодорогой на юге Большеземельской тундры / Д.А. Каверин, А. В. Пастухов, А. Б. Новаковский // Криосфера Земли. – 2020. – № 1. – С. 23–33. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(23-33).

23. **Каверин Д. А.** Влияние микроклиматических и ландшафтных изменений на температуру и глубину сезонного протаивания почв при полевом эксперименте в Большеземельской тундре / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, М. Марущак, К. Биазы, А. Б. Новаковский // Криосфера Земли. – 2020. – Т. XXIV, № 4. – С. 34–45. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(34-45).

24. **Каверин, Д. А.** Статистический анализ климатических предикторов температуры почв северо-востока европейской части России / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, Л. С. Шарая, П. А. Шарый // Метеорология и Гидрология. – 2020. – № 12. – С. 77–85.

25. Väliřanta, M. Warming climate forcing impact from a sub-arctic peatland as a result of late Holocene permafrost aggradation and initiation of bare peat surfaces / M. Väliřanta, M. Marushchak, J. - P. Tuovinen, A. Lohila, C. Biasi, C. Voigt, H. Zhang, S. Piilo, T. Virtanen, A. Räsänen, **D. Kaverin**,

A. Pastukhov, A. B. K. Sannel, E. - S. Tuittila, A. Korhola, P. J. Martikainen // Quaternary Science Reviews. – 2021. – Vol. 264. – P. 2-10. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107022>.

26. Елсаков, В.В. Сезонные изменения высоты поверхности почв предгорных ландшафтов Полярного Урала по данным инструментальных измерений и радиолокационной интерферометрии / В. В. Елсаков, Д. А. Каверин, В. В. Щанов // Криосфера Земли. – 2021. – Т. XXV, № 5. – С. 42–54. – DOI: 10.15372/KZ20210505.

27. **Kaverin, D.** Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // D. Kaverin, G. Malkova, D. Zamolodchikov, N. Shiklomanov, A. Pastukhov, A. Novakovskiy, M. Sadurtdinov, A. Skvortsov, A. Tsarev, A. Pochikalov, S. Malitsky, G Kraev // Polar Geography. – 2021. – Vol. 44. – DOI: 10.1080/1088937X.2021.1981476.

Статьи в научных журналах из перечня ВАК:

28. **Каверин, Д. А.** Исследование тундровых мерзлотных почв в системе «деятельный слой – многолетняя мерзлота» (северо-восток европейской России) / Д. А. Каверин, Г. Г. Мажитова, Ф. М. Ривкин, А. В. Пастухов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1. – С. 52–58.

29. **Каверин, Д. А.** О современном состоянии почвенно-геокриологического комплекса в южной тундре европейского северо-востока / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, Г. Г. Мажитова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2012. – Вып. 2 (10). – С. 51–56.

30. **Каверин, Д. А.** Особенности температурного режима светлоземов северотаежных ландшафтов (европейский северо-восток России) / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов, Е. В. Жангуров // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2016. – № 1 (25). – С. 23–29.

31. **Каверин, Д. А.** Особенности температурного режима сезоннопромерзающих почв тундровых ландшафтов европейского северо-востока России / Д. А. Каверин, А. В. Пастухов // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2017. – Вып. 87. – С. 3–21. – DOI:10.19047/0136-1694-2017-87-3-21.

Патенты:

32. Пастухов, А. В. Способ ручного бурения мерзлых горизонтов в почвах и верхнем слое многолетнемерзлых пород с одновременным отбором ненарушенных проб почвогрунтов / А. В. Пастухов, Д. А. Каверин // Патент № 2673571, Российская Федерация, МПК E02D1/04(2006.01). Институт биологии Коми НЦ УрО РАН; № 2017100289/03, заявл. 09.01.2017; опубл. 28.11.2018. – Бюл. № 19.