На правах рукописи

Шматова Анастасия Геннадьевна

МИКРОСТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПОДЗОНЫ ТИПИЧНЫХ ТУНДР ЕТР: РАЗНООБРАЗИЕ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИНАМИКА

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в отделе географии и эволюции почв Института географии Российской академии наук

Научный руководитель:	**Сергей Викторович Горячкин** доктор географических наук, главный научный сотрудник отдела географии и эволюции почв Института географии Российской академии наук
Официальные оппоненты:	**Герасимова Мария Иннокентиевна** доктор биологических наук, профессор кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
	Каверин Дмитрий Александрович доктор географических наук, старший научный сотрудник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук
Ведущая организация:	Санкт-Петербургский государственный университет (Институт наук о Земле)

Защита состоится «23» октября 2026 года в 11 час. 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.049.04 при Институте географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН и на интернет-сайте http://igras.ru/4554

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат просим направлять в двух вариантах: в электронном виде на e-mail d00204603@igras.ru, а также распечатанный вариант, заверенный подписью и печатью, на адрес Института: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4 (в одном экземпляре)

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук Белоновская Елена Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Почвенный покров тундр отличается высокой неоднородностью на микроуровне [Фридланд, 1972а, 1984; Васильевская, Караваева, Наумов, 1993; Горячкин, 2010] – наличием разнообразных криогенных микроструктур почвенного покрова (КМС). В первую очередь это связано с наличием многолетнемерзлых пород и проявлением криогенных процессов, происходящих в деятельном слое, которые нарушают исходное залегание почвенных горизонтов и могут создавать специфический криогенный микрорельеф [Washburn, 1956, 1973; Достовалов, Кудрявцев, 1967; Романовский, 1993; Ершов, 2002; Гаранкина, 2013]. Существующие подходы к характеристике и типизации КМС, разработанные в рамках теории структур почвенного покрова [Фридланд, 1972а, 1984; Атлас Арктики, 1985], как и классификация структурных грунтов Уошборна [Washburn, 1956, 1973], на наш взгляд, не уделяют должного внимания сложному строению почвенного тела, нарушенному криогенными процессами. Помимо этого, подзона типичных тундр Европейского сектора Арктики, в особенности ее западная часть, менее изучена по сравнению с более южными и восточными регионами [Иванова, Полынцева, 1952; Игнатенко, 1979; Горячкин, 2010; Тонконогов, 2010].

В настоящее время, благодаря развитию технологий дистанционного зондирования и современных методов почвенной картографии и ГИС становится возможным значительно продвинуться в решении вопросов распространения КМС и разнообразия их геометрических форм. Анализ цифровых моделей рельефа дает возможность на современном уровне охарактеризовать геоморфологическую позицию той или иной структуры, выявить факторы пространственной приуроченности. Современные методы почвенной картографии позволяют на новом уровне уточнить наши представления о составе почвенного покрова тундр. Анализ данных дистанционного зондирования Земли позволяет выявлять динамику растительного покрова и влажности поверхности [Shevtsova et al., 2020; Magnusson et al., 2021] и, таким образом, определять возможные тренды в динамике почвенного покрова.

Объектом исследования выбран почвенный покров подзоны типичных тундр Европейской территории России (ЕТР). **Предмет исследования:** криогенные микроструктуры почвенного покрова, их разнообразие, распространение и динамика, а также их участие в составе почвенного покрова.

Цель исследования: выявить разнообразие, распространение и динамику криогенных микроструктур автономного почвенного покрова в западной части подзоны типичных тундр ЕТР.

Задачи исследования:

1) Выявить и описать почвы района исследований, дать характеристику их морфологических и химических свойств;

2) Разработать подходы к описанию криогенных микроструктур почвенного покрова для задач их типизации с учетом существующих методик;

3) Выделить и описать наиболее типичные микроструктуры почвенного покрова районов исследования, дать им подробную характеристику согласно разработанным подходам;

4) Сопоставить морфологическое строение описанных микроструктур с ранее выделявшимися типами, установить соответствия или обосновать выделение новых типов;

5) Обобщить полученный материал и проанализировать разнообразие криогенных микроструктур по положению в ландшафте, составу компонентов и контрастности и связи между ними;

6) Составить почвенные карты ключевых участков и оценить степень участия микроструктур в почвенном покрове различных ландшафтов;

7) Провести анализ данных дистанционного зондирования Земли для выявления динамики микроструктур почвенного покрова вследствие климатических изменений.

Методологическую основу работы составляют: морфологические исследования строения почвенных тел [Розанов, 2004; Кириллова, Силёва, 2017] и их диагностика [Полевой определитель почв России, 2008; Герасимова, Ананко, Конюшков, 2018; Ананко, Герасимова, Конюшков, 2020; Аветов, Кузнецов, Шишконакова, 2021; Хитров, Герасимова, 2022; World Reference Base…, 2022], типизация и характеристика криогенных микроструктур почвенного покрова [Фридланд, 1972; Атлас Арктики, 1985; Национальный атлас…, 2011], сравнительно-географический метод и пространственный анализ почвенного покрова ключевых участков при помощи комплекса методов почвенной картографии, дистанционного зондирования и ГИС [Методология составления…, 2006; Медведев, Алексеенко, 2017]. Изучение почвенного покрова дополнено анализом физико-химических свойств почв [Теория и практика…, 2006].

Области исследования в соответствии с паспортами специальностей. Специальность 1.6.12 «физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов»: 2. Структура, функционирование, динамика ландшафтов; 7. География и картография почв, происхождение и структура почвенного покрова.

Фактический материал и личный вклад автора. Полевой материал был собран автором в период с 2018 по 2023 год в ходе 5 экспедиций на остров Колгуев и экспедиции 2020 года – на полуостров Болванский (ключевой участок B) и острова Ловецкий и Кашин в Печорской губе (ключевой участок L). На Колгуеве автором изучены три района: среднее течение реки Песчанки (ключевой участок KC), центральный возвышенный район (ключевой участок KH) и восточный район (ключевой участок KE). В работе были задействованы архивы спутниковых изображений открытого доступа: Landsat, Sentinel, Google Earth, а также цифровая модель местности Arctic DEM. Детальные ортофотопланы и цифровые модели местности, использованные в работе, были составлены по материалам съемок с БПЛА, выполненных автором, а также другими участниками экспедиций: А.Е. Гнеденко, И.А. Лавриненко. При составлении карты почвенного покрова полуострова Болванский использовалась карта местообитаний, составленная И.А. Лавриненко [2021].

Автором был полностью выполнен полевой этап работы, проведена пробоподготовка образцов почв для проведения лабораторных анализов, проанализированы полевые и лабораторные данные и подготовлен текст диссертации. Содержание общего органического углерода и азота было определено методом сухого сжигания в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГ РАН (г. Москва). Остальные анализы – определение гранулометрического состава, электропроводности, pH водного и солевого, содержания дитионитрастворимых («несиликатных») соединений железа по методу Мера-Джексона и оксалаторастворимых («аморфных») форм железа и алюминия по Тамму – были выполнены в химической лаборатории Отдела географии и эволюции почв.

Научная новизна. Для подзоны типичных тундр ЕТР проведен анализ состава почвенного покрова на уровне микроструктур. В ходе исследований были уточнены и разработаны подходы к описанию и типизации криогенных микроструктур. В результате на

исследованной территории выделено 9 морфотипов микроструктур почвенного покрова автономных позиций: помимо пучинно-бугорковатых, трещинно-полигональных и крупнополигональных микроструктур впервые в этой подзоне детально описаны спорадически-пучинно-пятнистые и полосчатые микроструктуры; впервые выделены и охарактеризованы как самостоятельный морфотип спорадически-пучинные, трещинно-конвективные, кольцевые и западинковые микроструктуры. Для всех перечисленных типов микроструктур была установлена их ландшафтная приуроченность, характер связи между компонентами и разнообразие состава. Помимо контрастных криогенных микроструктур – комплексов – были описаны и слабоконтрастные – пятнистости.

В ходе исследований было выявлено, что в составе автономного почвенного покрова подзоны типичных тундр ЕТР доминируют – в зависимости от региональных особенностей – почвы с криометаморфическими горизонтами, подзолы или криоземы. Анализ состава почвенного покрова плакоров показал, что в некоторых ландшафтах он обладает сравнительно низкой контрастностью на уровне микроструктур: в составе почвенного покрова трех из пяти ключевых участков доля комплексов составляла менее половины площади автономных поверхностей.

В работе проведена оценка потенциальной динамики почвенного покрова подзоны типичных тундр ЕТР под влиянием климатических изменений: установлено, что наиболее подвержены изменениям спорадически-пучинно-пятнистые и трещинно-полигональные микроструктуры, выявлен потенциал образования новых пучинно-бугорковатых структур, связанный с трендом зарастания осоковых ложбин ивняками.

Теоретическая и практическая значимость. Подход к описанию криогенных микроструктур почвенного покрова, разработанный и опробованный в настоящей работе, закладывает основы для их дальнейшей типизации и классификации. В нем учитываются сложность строения и формирования микроструктур: особое внимание уделяется внутренней организации, а геометрическое строение рассматривается независимо от генезиса микроструктуры (генезиса криогенных деформаций). Проведенная типизация КМС и описание их строения, в особенности данные о распределении и качестве органического вещества, являются необходимой основой для расчетов и моделирования динамики запасов органического вещества почв. Выявленная ландшафтная приуроченность и географическое распространение микроструктур позволяют вывести эти расчеты на пространственный и даже региональный уровень, качественно увеличивая точность оценок.

Защищаемые положения:

I. В западной части подзоны типичных тундр ЕТР *почвы с криометаморфическим горизонтом* (*криометаморфические почвы и подбуры криометаморфические*) являются одними из основных, а местами преобладающими компонентами почвенного покрова автономных позиций, формируя как однородные ареалы, так и входя в состав микроструктур. Наряду с ними, в некоторых районах, существенную роль в почвенном покрове помимо *подбуров* играют *криоземы*. *Глеевые почвы (глееземы, торфяно-глееземы* и *глееземы криометаморфические*) на автономных поверхностях формируются преимущественно в составе микроструктур, в связи с чем их преобладание в почвенном покрове может быть обеспечено только высокой долей комплексов с их участием.

II. На исследованной территории выделено девять криогенных микроструктур почвенного покрова, относящихся к трем группам: 1) ранее описанные в европейских тундрах

– *пучинно-бугорковатые, трещинно-полигональные и крупнополигональные*; 2) ранее описанные в тундрах других регионов и впервые – в европейских типичных тундрах – *спорадически-пучинно-пятнистые и полосчатые*; 3) впервые выделенные и охарактеризованные как морфотип КМС: *спорадически-пучинные, трещинно-конвективные, кольцевые и западинковые микроструктуры*.

III. Не все криогенные микроструктуры являются комплексами, как в основном считалось ранее: были описаны участки с выраженным микрорельефом, но слабоконтрастными комбинациями почв – пятнистостями (большинство крупнополигональных и некоторые пучинно-бугорковатые микроструктуры).

IV. Криогенные комплексы не всегда доминируют в почвенном покрове тундровых ландшафтов, а низкая доля комплексов может быть характерна для почвенного покрова, сформированного как на песчаных, так и на суглинистых отложениях. В трех из пяти ключевых участков контрастные микроструктуры уступают место либо ЭПА криометаморфических почв, либо слабоконтрастным микроструктурам, в состав которых входят подбуры криометаморфические или подбуры оподзоленные.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается обширной географией работ, использованием большого объема фактического материала, привлечением данных дистанционного зондирования различного пространственного разрешения и методов ГИС для пространственного анализа. Было исследовано около 200 разрезов и траншей, составлено 5 карт ключевых участков.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были представлены: на 23-м Всемирном конгрессе по почвоведению (Нанкин, КНР, 2026), VIII и IX съездах Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (2022 (онлайн); Казань, 2024), на научных семинарах «Почвы во времени и пространстве» им. В.О. Таргульяна – в 2023 и 2024 г. и семинаре «Теоретические проблемы почвенного криогенеза» (Макеевские чтения) – дважды в 2025 г. Помимо этого, материалы исследования были представлены в докладах и тезисах на следующих конференциях: конференции молодых ученых «Почвоведение: горизонты будущего» (Москва, 2019, 2022, 2023, 2024), молодежной школе-конференции «Меридиан» (Курск, 2018, 2019; Москва, 2023), ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований «Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России» (Санкт-Петербург, 2019, 2022), научно-практической конференции «Геодезия, Картография, Геоинформатика и Кадастры. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2019), международной конференции «Polar Early Career Conference» (2021, онлайн), конференции «Актуальные вопросы изучения и сохранения растительного мира Арктики и горных районов» (Апатиты, 2021, онлайн), интернет-конференции «Природная и антропогенная неоднородность почв и статистические методы ее изучения» (Москва, 2021, онлайн), научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в антропоцене» (Салехард, 2023), конференции «К познанию цельного образа криосферы Земли. Изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики» (Тюмень, 2023), конференции «Биологические проблемы Севера» (Магадан, 2024), конференции по мерзлотоведению «Проблемы криосферы Земли» (Пущино, 2025).

Публикации. Материалы исследований изложены в 24 печатных работах, включая 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Scopus, RSCI, Белый список, а также в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, выводов, списка сокращений, списка терминов, списка литературы (196 источников, из которых 45 на иностранном языке) и 5 приложений. Содержательная часть диссертации изложена на 148 страницах, иллюстрирована 20 таблицами и 57 рисунками. Общий объем диссертации с приложениями составляет 217 страниц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю С.В. Горячкину за многолетнее наставничество, ценные советы и помощь в работе над диссертацией и написании статей. Также автор признателен А.А. Медведеву и И.О. Алябиной, руководившим работой на ее начальных этапах. Автор благодарит коллектив отдела географии и эволюции почв ИГ РАН за обсуждение и советы на всех этапах подготовки работы, коллектив лаборатории радиоуглеродного датирования ИГ РАН за помощь в работе с образцами. Автор особо благодарит коллег: Н.О. Тельнову, Д.Е. Конюшкова и С.Ф. Хохлова, Г.В. Матышака, С.В. Лойко, И.Г. Шоркунова и Е.А. Гаранкину, Ф.А. Романенко, А.В. Бартову и Е.А. Гусева, А.А. Попову и Е.И. Пижанкову, О.В. Лавриненко и всех, кто на разных этапах работы консультировал, давал советы, помогал с подготовкой к экспедиции и оказывал моральную поддержку. Автор выражает глубокую благодарность П.М. Глазову и Ю.А. Лощагиной – бессменным организаторам Колгуевских экспедиций; а также И.А. Лавриненко и О.В. Лавриненко – организаторам экспедиции на Болванский п-ов и острова Печорской губы. Автор благодарит Д.Г. Петрова, В.А. Лобкова, А.В. Кондратьева, А.Е. Гнеденко и всех участников экспедиций – за помощь в полевых работах, плодотворную атмосферу и приятную компанию. Кроме того, работа не была бы выполнена без всесторонней моральной и материальной поддержки родными и близкими.

Полевые работы были выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ №22-17-00168 (рук. А.А. Тишков); анализ космических снимков для выявления динамики ландшафтов был проведен в рамках гранта РФФИ №18-05-60057 (рук. А.А. Тишков). Материалы исследования обобщены и представлены в диссертационной работе в рамках выполнения гранта Министерства науки и высшего образования РФ №075-15-2024-554 (рук. чл.-корр. РАН О.Н. Соломина). Лабораторные и морфологические исследования выполнены в рамках темы государственного задания FMWS-2024-0010 (рук. И.В. Замотаев). Систематизация и анализ криогенных микроструктур по полевым и литературным данным был проведен за счет средств мини-гранта ИГ РАН (рук. А.Г. Шматова).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние проблемы

Подходы к изучению криогенных микроструктур почвенного покрова. Криогенные микроструктуры почвенного покрова – природное явление, формирующееся в результате действия криогенных процессов и являющееся одновременно частью почвенного покрова и элементом ландшафтной структуры в целом. В зависимости от того, под каким углом рассматривается данное явление, могут использоваться различные термины [Рычагов, 2006; Мудров, 2007; Lewkowicz et al., 2024]: *криогенный микрорельеф, структурные грунты (patterned ground), криогенные почвенные комплексы* [Васильевская, 1980][1], или более узкие

[1] не стоит путать с почвенно-мерзлотным комплексом по Губину и Лупачеву [2008]

ландшафтные названия: *пятнистые тундры, полигональные тундры, бугорковатый микрорельеф, hummocks, frost boil* и т.д. Все эти термины имеют отношение к одному явлению неоднородности почвенного и растительного покрова, возникшей в результате действия различных криогенных процессов, происходящих в деятельном слое.

При изучении почвенного покрова возможны два теоретических подхода к рассмотрению его неоднородности: в рамках теории структуры почвенного покрова [Фридланд, 1965, 1972а, 1984] каждое латеральное изменение в наборе почвенных горизонтов или признаков определяет смену компонента почвенного покрова, даже если расстояние между ними очень мало и не превышает 1 метра; при втором подходе почвенный покров с регулярной неоднородностью рассматривается как ареал (полипедон) одной, но латерально циклически анизотропной почвы [Джеррард, 1984; Соколов, 1997; Johnson, 1963]. Согласно концепции структуры почвенного покрова, микроструктура состоит из регулярно повторяющихся микрокомбинаций и характеризуется определенным пространственным узором, генезисом и эволюцией. Благодаря выделению отдельных компонентов внутри почвенной микрокомбинации, возможно рассмотрение и ряда других свойств: состава компонентов, их контрастности и характера связи между ними [Фридланд, 1972]. В связи с этим в настоящей работе реализован именно этот подход к описанию и характеристике микронеоднородностей почвенного покрова, разработанный в рамках теории структур почвенного покрова.

Подходы к классификации криогенных микроструктур почвенного покрова. В рамках наиболее полной типизации криогенных микроструктур почвенного покрова, предложенной в Атласе Арктики [1985], выделяется до 13 генетико-геометрических типов комплексов (Таблица 2), каждый из которых, согласно карте, может быть реализован в почвенном покрове в виде одной или нескольких комбинаций почв. Также, согласно легенде к карте, один и тот же набор почв может образовывать комплексы разных типов.

Альтернативным вариантом типизации является классификация структурных грунтов [Washburn, 1956, 1973], которая, в частности, используется зарубежными почвоведами при описании пространственно-неоднородных почв [Drew, Tedrow, 1962; Ping et al., 2017]. В классификации структурных грунтов, в отличие от типизации КМС в Атласе Арктики [1985], такие характеристики как наличие сортировки крупнообломочного материала, узор поверхности и генезис – рассматриваются независимо друг от друга, в то же время, внутреннее строение и состав почв не нашли отражения в системе классификации.

Особенности почвенного покрова полярных областей. Почвенный покров тундровой зоны обладает характерными особенностями [Васильевская, Караваева, Наумов, 1993; Горячкин, 2010; Национальный атлас почв…, 2011]. Главная из них – высокая комплексность, то есть преобладание в почвенном покрове контрастных криогенных микроструктур [Горячкин, Караваева, Таргульян, 1998]. Ареалы однородного почвенного покрова скорее представляют собой исключение: на почвенных картах выделяются относительно небольшие ареалы распространения подбуров на песчаных отложениях [Государственная Почвенная Карта…, 1982; Почвенная карта РСФСР, 1988; Национальный атлас почв…, 2011]. Другая важная особенность – неустойчивое, динамическое состояние почвенного покрова, связанное с цикличностью процессов пятно-образования, а также процессами пучения и термокарста, вызывающими направленные изменения [Караваева, Полтева, 1967; Тыртиков, 1979; Васильевская, Караваева, Наумов, 1993; Михайлов, 2020].

Почвенно-географическое районирование европейских тундр. Подзона типичных (северных) тундр в пределах ЕТР выделяется на острове Колгуев, полуострове Русский

Заворот, севере Большеземельской тундры, острове Вайгач и Югорском полуострове (Рисунок 1) [Грибова, 1972; Атлас Арктики, 1985; Лавриненко, 2012]. Все эти территории, за исключением острова Вайгач, относятся к *Канинско-Печорской почвенной провинции* подзоны *тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры* (Рисунок 1) [Карта почвенно-экологического…, 2019].

Рисунок 1 – Ключевые участки исследования и границы почвенного [Карта почвенно-экологического…, 2019] и геоботанического районирования [Лавриненко, Петровский, Лавриненко, 2019]

В пределах распространения типичных тундр на территории ЕТР можно выделить, согласно почвенным картам, районы доминирования различных микроструктур почвенного покрова и почв [Атлас Арктики, 1985; Почвенная карта РСФСР, 1988]: (1) области распространения полигональных и плоскобугристых комплексов торфяных почв, приуроченные к низким морским террасам; (2) области распространения пучинно-бугорковатых комплексов, глеевых почв и подбуров – на острове Колгуев и в Большеземельской тундре; и (3) области преобладания полигонально-трещинных и каменно-многоугольниковых комплексов и литоземов, наравне с глееземами и подбурами, – в восточной части Европейских тундр: на Югорском полуострове и острове Вайгач. В настоящей работе будут рассмотрены первые две области.

Изученность почвенного покрова Восточно-Европейских тундр. Основные представления о специфике тундрового почвообразования и характере почвенного покрова европейских тундр основываются на исследованиях, проведенных преимущественно в хорошо изученной подзоне южных кустарниковых тундр [Григорьев, 1925; Иванова, Полынцева, 1952; Полынцева, 1958; Растительность лесотундры…, 1967; Игнатенко, 1972а; Почвы и растительность…, 1972; Вадюнина, Худяков, 1974; Тонконогов, Пастухов, Забоева, 2006; Мажитова, 2008; Лаптева, 2011; Русанова, 2010, 2011, 2015; Русанова, Шахтарова, 2012, 2013; Пастухов и др., 2018; Каверин и др., 2023; Каверин, Пастухов, 2025]. Также достаточно хорошо изучены почвы Югорского полуострова и острова Вайгач [Игнатенко, 1979; Горячкин, 2010; Остров Вайгач: природа…, 2014], относящиеся к типичной подзоне, но заметно отличающиеся от более западных районов ЕТР как по климатическим параметрам, так и по составу отложений.

Почвенный покров западной части типичных тундр ЕТР остается значительно менее изученным [Ливеровский, 1934; Игнатенко, 1979; Русанова, 1996; Русанова, Канев, 2003; Русанова, Денева, Канев, 2004; Горячкин, 2010; Каверин и др., 2016а; Каверин и др., 2026]. Тем не менее, обобщая разрозненные данные о составе почвенного покрова типичных тундр ЕТР, можно выделить следующий список почв, которые в разное время описывались на этой территории: 1) глеевые почвы: глееземы, торфяно-глееземы, перегнойно-глеевые и глееземы криометаморфические, 2) альфегумусовые почвы: подбуры (в том числе оподзоленные), дерново-подбуры, подзолы (на границе с южными тундрами), торфяно-подзолы и торфяно-подзол-элювоземы. При этом для изучаемого региона – западного сектора подзоны типичных тундр ЕТР – помимо описанных глеевых и альфегумусовых почв, теоретически предполагаются характерными криоземы и криометаморфические почвы, формирующиеся на морских и озерно-ледниковых суглинках и глинах [Горячкин, 2010].

Глава 2. Физико-географическая характеристика районов исследования

Климат. По сравнению с другими арктическими районами для изученного региона характерны более мягкая зима, прохладная длительная весна и такая же осень. Температуры воздуха самых теплых месяцев (июль – август) составляют +8°С на Колгуеве (метеостанция Колгуевского северного маяка), и +14°С в Нарьян-Маре. Распределение зимних температур воздуха в отличие от летних, имеет обратный градиент за счет отепляющего влияния Баренцева моря: среднемесячная температура февраля на Колгуеве составляет -13°С, а в Нарьян-Маре – около -17°С. Среднегодовое количество осадков варьирует в диапазоне 300-450 мм. По данным сайта «Погода и климат» [https://pogodaiklimat.ru/history/22095.htm] за последние 40 лет наблюдается рост среднегодовых температур острова Колгуев за счет более теплых летних месяцев. На фоне роста температур сокращается количество осадков, выпадающих на острове, особенно в зимние месяцы, что может, напротив, способствовать большему промерзанию почв в зимнее время под маломощным снежным покровом и развитию криогенных процессов.

Многолетняя мерзлота в изученных районах прерывистая или сплошная: остров Колгуев относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород; Болванский полуостров расположен на границе сплошного и прерывистого распространения; на островах Печорской Губы многолетняя мерзлота по разным данным занимает от 50 до 70% территории. Глубина сезонного протаивания, по нашим и литературным данным, в рассматриваемом регионе составляет: 0.3 м (реже 0.7 м) на торфяных почвах; 0.8–1.5 м на суглинистых породах; 1.5–2 м на песчаных. [Суходольский, 1982; Геокриология СССР, 1988; Ершов, 2018; Малкова, Царев, 2024].

Рельеф и чехол поверхностных отложений острова Колгуев и полуострова Болванский сформировались в течение плейстоцена в результате чередования этапов оледенения и морских трансгрессий. Это определяет сложный характер форм рельефа и залегания четвертичных отложений, которые представляют из себя чередование слоев песков, суглинков и глин разного пространственного простирания и мощности. Вследствие недостаточной геологической изученности региона разными авторами отложения острова Колгуев и полуострова Болванский относятся к морским, ледниковым или ледниково-морским [Астахов, Свенсен, 2011; Застрожнов и др., 2013; Журавлёв и др., 2014; Карта четвертичных образований…, 2014]. Не вызывает дискуссий лишь строение островов Печорской губы,

которые сформировались в течение голоцена и сложенны морскими и аллювиально-морскими песками [Карта четвертичных образований…, 2014]. В таблице 1 приведена геоморфологическая характеристика районов исследования и ключевых участков анализа и картографирования почвенного покрова.

Таблица 1 – Геоморфологическая характеристика изученных ландшафтов и ключевых участков на них

Ландшафт	**Возвышенная часть о. Колгуев**	**Центральная часть о. Колгуев**	**Восточная часть о. Колгуев**	**Болванский п-ов**	**Острова Печорской губы**
Высоты, м от у.м.	80-170 м	60-80 м	20-50 м	20-30 м	0-5 м
Характер рельефа	Холмистая террасовидная равнина	Пологая террасовидная равнина	Пологая террасовидная равнина	Холмистая равнина	Плоская террасовидная равнина
*Густота эрозионного расчленения**	100-200 м	400-500 м	300-500 м	60-70 м	400-500 м
Ключевой участок	**KH**	**KC**	**KE**	**B**	**L**
Координаты ключевого участка	69.1190°N, 48.7094°E	69.1949°N, 48.9198°E	69.1233°N, 49.9643°E	68.2891°N, 54.5022°E	68.3538°N, 53.9578°E
Высоты, м от у.м.	100-110 м	60-70 м	20-30 м	20-30 м	0-5 м
Преобладающие формы рельефа плакора	Выпуклые холмы, правильных округлых очертаний, разделенные неглубокими ложбинами	Выположенные поверхности и выпуклые пологие склоны	Выположенные поверхности и ровные склоны, крупные депрессии	Холмы округлой и вытянутой формы	Плоские и слабо выпуклые поверхности
Преобладающая длина склона плакора	40-90 м	200-300 м	300-400 м	50-80 м	100-250 м
Преобладающая крутизна склонов	2-4°	0-1°	0-2°	1-4°	0°
Преобладающая форма автономных поверхностей	Выпуклая	Ровная, выпуклая	Ровная	Выпуклая	Ровная
*Глубина эрозионных врезов***	10 м	12-18 м	15-20 м	4-6 м	0 м
*Слагающие отложения****	СС	ОС, П	СС, ОС, П	ВС, П, ОС	П
Расстояние до берега моря/ залива	18 км	25 км	6 км	0 км	1 км

* Рассчитывалась как ½ расстояния между тальвегами [Рычагов, 2006]

** Рассчитывалась как перепад высот от тальвега до водораздела [Рычагов, 2006]

*** Тип отложений: СС – «серые» суглинки; ВС – валунные суглинки; ОС – опесчаненные суглинки; П – пески.

Растительность. Исследованные территории расположены в пределах подзоны типичных (или северных гипоарктических) тундр. В подзоне типичных тундр кустарники имеют ограниченное распространение; на плакорных поверхностях преобладают кустарничковая (травяно-кустарничково-моховая) растительность. Именно такая растительность характерна для изученных участков. Наибольшая доля кустарников на плакорах наблюдается в восточной части острова Колгуев, где ивняки выходят из ложбин на пологие склоны плакоров. Ерник (*Betula nana*) ни на одном из исследованных районов не занимает доминирующих позиций в растительности, уступая другим кустарничковым формам растительности. На возвышенных районах Колгуева ерник отсутствует вовсе.

На Болванском полуострове отмечаются реликтовые островки елей, почвы под которыми описаны ранее [Русанова, Денева, 2006], данные о наличии лесов на Колгуеве в голоцене отсутствуют, так как специальные исследования не проводились.

В последнее время во многих районах Арктики отмечается динамика растительности, связанная с климатическими изменениями, отмечаемая как по наземным [Белоновская и др., 2016; Beamish et al., 2020; Heijmans et al., 2022; Lavrinenko, Lavrinenko, 2022; Lavrinenko, Tyusov, Petrovsky, 2022], так и по дистанционным исследованиям [Елсаков, Телятников, 2013; Елсаков, 2017; Тигеев, Московченко, Фахретдинов, 2021; Phoenix, Bjerke, 2016; Bhatt et al., 2017; Lara et al., 2018; Fu et al., 2019].

Глава 3. Методы исследования

Полевые исследования проводились в летний период (июнь-август) на Болванском полуострове, островах Печорской губы и в разных районах острова Колгуев с 2018 по 2023 год. Полевые исследования включали: 1) описания почв и ландшафтов [Розанов, 2004; Методология составления…, 2006; Кириллова, Силёва, 2017]; 2) описания микрорельефа по разработанным критериям; 3) аэрофотосъемку ключевых участков и микроструктур с БПЛА [Медведев, Алексеенко, 2017; Андреев, 2023]. Из наиболее типичных почв изучаемого региона, в особенности впервые выделенных типов, были отобраны образцы для определения стандартного набора почвенных свойств: гранулометрического состава, pH водного и солевого, потери при прокаливании, содержания общего органического углерода и азота методом сухого сжигания, содержания дитионитрастворимых («несиликатных») соединений железа по методу Мера-Джексона, содержания оксалаторастворимых («аморфных») соединений железа и алюминия по методу Тамма, а также электропроводности [Теория и практика…, 2006].

Типизация криогенных микроструктур почвенного покрова и их сопоставление с ранее описанными криогенными комплексами проводились на основании сравнения закономерностей строения почвенного профиля (Таблица 2, Рисунок 3). Для этого в работе используется термин *"морфотип КМС",* под которым понимается характерное взаиморасположение органических и минеральных морфонов в объеме регулярно организованного почвенного континуума, рассматриваемое в срезе криогенной микроструктуры почвенного покрова (обычно – траншее). Закономерности расположения морфонов в почве являются интегральным результатом действия процессов, сформировавших микроструктуру.

Таблица 2 – Сопоставление типов криогенных микроструктур, выделенных ранее, и морфотипов, выделяемых в настоящей работе

Атлас Арктики [1985] (с обобщениями)	**Почвенная карта РСФСР [1988]**	**Национальный атлас почв РФ [2011]**	**Микроструктуры, выделенные в работе**
Спорадически-пятнистые	Неупорядоченно-пятнистые	Пятнисто-бугорковатые	Спорадически-пучинно-пятнистые
Пучинно-бугорковатые	Бугорковые кочкарниковые		Пучинно-бугорковатые
			*Спорадически-пучинные**
Трещинно-нанополигональные	Полигонально-трещинные	Трещинно-полигональные	Трещинно-полигональные
			Трещинно-конвективные
Крупноблочные		Не выделялись	Крупнополигональные
Каменно-многоугольниковые	Каменно-многоугольниковые	Не выделялись	Не выявлены
Плоскобугристые торфяники	Плоскобугристые	Крупно- и плоскобугристые комплексы	Не рассматриваются
Бугристых торфяники	Крупнобугристые		Не выявлены
Солифлюкционно-линейный и пятнистый	Не выделялись	Не выделялись	Не выявлены
Не выделялись	Округло-пятнистые западинные	Не выделялись	Не выявлены
Не выделялись	Не выделялись	Не выделялись	*Полосчатые*
			Кольцевые
			Западинковые

Примечание: курсивом выделены новые, впервые выделенные морфотипы

Характеристика КМС. В дополнение к обычным характеристикам микроструктур, принятым в рамках теории СПП, в работе особое внимание уделяется внутреннему строению почвенного тела (морфотипу). Помимо этого, генезис и геометрический узор поверхности рассматривались независимо друг от друга, как это сделано в классификации структурных грунтов [Washburn, 1956, 1973],

Таким образом, в работе рассмотрены следующие характеристики микроструктур: (1) положение в ландшафте (рельеф, растительность, почвообразующие породы); (2) узор поверхности – его геометрические формы, образованные чередованием либо повышений и понижений поверхности, либо узором растительности, либо пятен голого грунта; (3) морфотип; (4) компоненты микроструктуры – набор различных типов почв, входящих в состав КМС; (5) контрастность компонентов; (6) наличие и характер генетической связи между компонентами; (7) возможный генезис микроструктуры.

В работе использовались следующие критерии определения контрастности микроструктур: комплексы – различается набор диагностических горизонтов почв-компонентов, пятнистости – различия на уровне их отдельных признаков или диагностически-значимой выраженности признака (E – e, G – g).

Диагностику почв проводили согласно Полевому определителю почв России [2008], а также ряду литературных источников [Аветов, Шишконакова, 2019; Ананко, Герасимова, Конюшков, 2020; Хитров, Герасимова, 2022; World Reference Base…, 2022]. При диагностике почв учитывались данные лабораторных анализов.

Почвенное картографирование. Для анализа состава почвенного покрова были составлены карты почвенного покрова 5 ключевых участков масштаба 1:3 000 – 1:10 000 с показом ареалов распространения тех или иных микроструктур.

Карты были составлены методами традиционной почвенной картографии с применением ГИС-технологий [Ульянова, Зборищук, 2005; Методология составления крупномасштабных…, 2006; Козлов, Сорокина, 2012; Савин, 2012]. Создание карт состояло из нескольких этапов: 1) составление списка почв и микроструктур территории; 2) разработка модели почвенно-ландшафтных связей на основе результатов полевых исследований; 3) анализ рельефа; 4) разработка легенды карты и эталонов дешифрирования космических и аэрофотоснимков; 5) отрисовка контурной основы карты методом визуального дешифрирования.

Дальнейший расчет площадей и оценка участия микроструктур различного типа в почвенном покрове проводились только для автономного почвенного покрова. Из анализа были исключены: подчиненные заболоченные позиции, склоны и днища балок, периодически затопляемые участки, недавно осушенные территории.

Анализ динамики структуры ландшафтов и почвенного покрова. Для того чтобы выявить изменения, происходящие в почвенном покрове и, в частности, микроструктурах, был проведен анализ временной серии космических снимков. Для работы были отобраны двенадцать снимков Landsat за период с 1987 по 2020 г., сделанные в летний сезон. Анализ был проведен для плакорных поверхностей острова Колгуев. Была использована методика, ранее разработанная для выявления динамики ландшафтной структуры [Шматова, Лощагина, Глазов, 2023].

Глава 4. Почвы как компоненты почвенного покрова и микроструктур

На исследованных территориях было описано 16 типов почв, относящихся к 6 отделам [Полевой определитель почв России, 2008]:

1) Альфегумусовые почвы: *подбуры, подзолы* и *торфяно-подзолы*;
2) Почвы с криометаморфическим горизонтом: *криометаморфические почвы, перегнойно-криометаморфические*, *дерново-криометаморфические, подбуры криометаморфические* (рабочее название для нового типа почв), а также *глееземы криометаморфические* (относятся к отделу глеевых почв);
3) *Криоземы и торфяно-криоземы*;
4) Глеевые почвы: *глееземы, глееземы криометаморфические и торфяно-глееземы* (в том числе *деструктивные)*;
5) Слаборазвитые почвы: *псаммоземы* и *псаммоземы гумусовые*;
6) *Торфяные олиготрофные* и *торфяные мезотрофные почвы*.

Почвы с криометаморфическим горизонтом – криометаморфические, светлоземы и глееземы криометаморфические – ранее были неоднократно описаны в зонах тайги, лесотундры и южных тундр [Тонконогов, Пастухов, Забоева, 2006; Пастухов, 2008; Пастухов, Забоева, 2010; Тонконогов, 2010; Русанова, Шахтарова, 2013]. В типичных тундрах ЕТР их описания единичны, однако теоретически предполагалось их более широкое распространение [Горячкин, 2010].

В настоящей работе установлено, что почвы с криометаморфическим горизонтом являются основным компонентом почвенного покрова острова Колгуев (Рисунок 2, Таблица 6) и в основном представлены типом *криометаморфических почв* (участвуют в составе

почвенного покрова в качестве самостоятельных ЭПА и в составе микроструктур) и, в меньшей степени, – типами *глееземов криометаморфических, подбуров криометаморфических и перегнойно-криометаморфических почв* (все три типа представлены преимущественно в составе микроструктур). На Болванском полуострове почвы с криометаморфическим горизонтом присутствуют ограничено и представлены только типом *подбуров криометаморфических*, приуроченных к опесчаненным суглинкам на отдельностоящих камоподобных холмах.

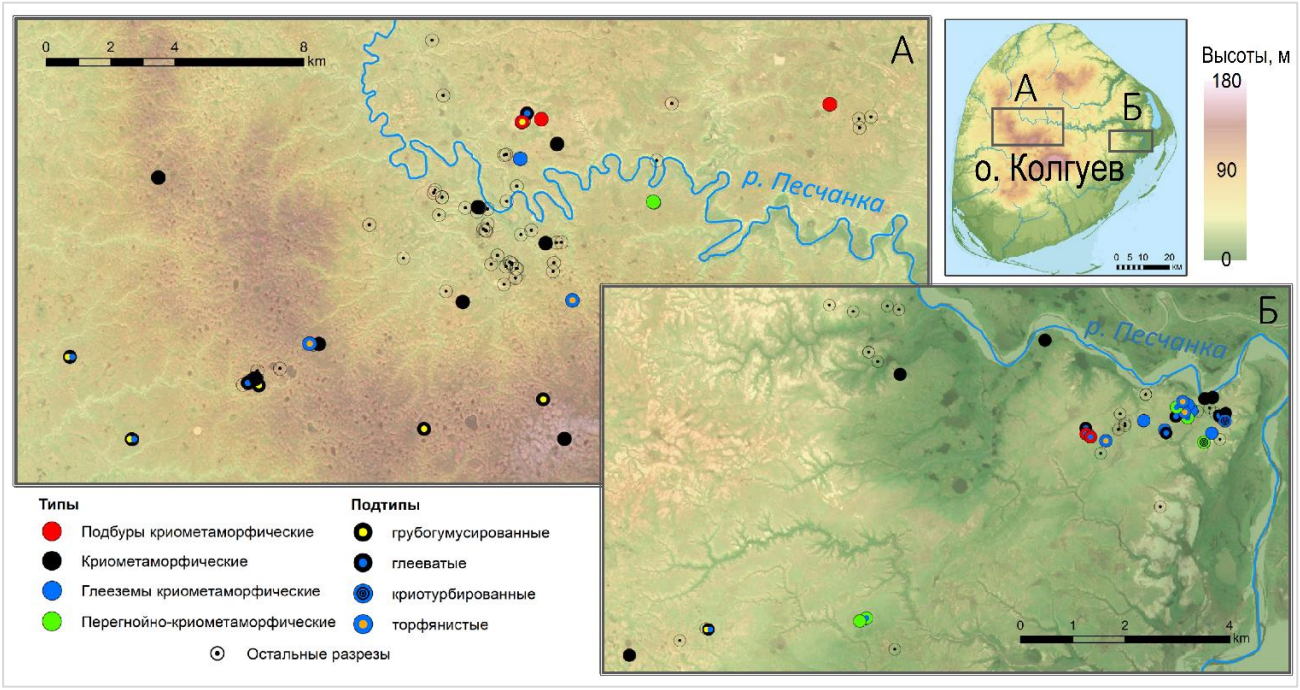

Рисунок 2 – Обследованные районы острова Колгуев (А, Б) и места описания почв с криометаморфическим горизонтом

Глеевые почвы на изученных территориях ограничено представлены в автономном почвенном покрове: на плакорах можно встретить следующие глеевые почвы: *глееземы* и *глееземы криометаморфические* – исключительно в составе микроструктур; *торфяно-глееземы деструктивные* – в качестве почв бугорков (в составе КМС) или почв пушициевых кочкарников (однородный ареал); *торфяно-глееземы типичные* представлены гомогенными ареалами в локальных гидроморфных условиях замкнутых понижений и выположенных участках склонов.

Криоземы наиболее распространены на Болванском полуострове, где входят в состав трещинно-полигональных микроструктур и образуют самостоятельные ЭПА. В первом случае они формируются на валунных суглинках, во втором – на легких почвообразующих породах. На Колгуеве криоземы распространены в его центральной части и также приурочены к серовато-бурым валунным суглинкам. На островах Печорской губы выделены *торфяно-криоземы* в составе пучинно-бугорковатых пятнистостей.

Таким образом, формирование криоземов либо почв с криометаморфическим горизонтом связано с литогенными причинами: криоземы приурочены к валунным суглинкам, супесям, пескам, а криометаморфические почвы – к опесчаненным и серым суглинкам – специфическим отложениям дискуссионного генезиса, наиболее распространенным на Колгуеве.

Подзолы и подбуры. Приведенные в работе описания подзолов и подбуров, выполненные на островах Колгуев и Ловецкий, подтверждают представления о том, что в подзоне типичных тундр подзолы уступают место подбурам оподзоленным не потому, что подзолы не формируются, а потому что признаки оподзоливания стираются вследствие криотурбационных процессов [Горячкин, Караваева, Таргульян, 1998; Горячкин, 2010]. При этом, по полученным данным, полной гомогенизации профиля и возвращения «к 0-моменту» не происходит: исчезает только маломощный подзолистый горизонт за счет перемешивания с подстилочно-торфяным и альфегумусовым горизонтом. Также в подзолах наблюдается приобретение подзолистым горизонтом буроватого оттенка (7,5 YR 6/2 по шкале Манселла) за счет прокрашивания гумусом в современный этап почвообразования: содержание общего органического углерода в горизонте E – 1.2%, в горизонте BHF – 0.5%. Аналогичный процесс был показан Русановой [2015] для подзолов южных тундр. При этом для исследованной области нельзя утверждать, под какой растительностью изначально формировались подзолы, так как данные о наличии или отсутствии лесной растительности в голоцене для данного региона отсутствуют.

Торфяно-подзолы криотурбированные были описаны на острове Ловецком на плоских террасовидных поверхностях с залеганием почвенно-грунтовых (надмерзлотных) вод в пределах почвенного профиля.

Псаммоземы гумусовые – слаборазвитые почвы с горизонтом W начальной аккумуляции гумуса[2] – были описаны в нескольких разрезах и прикопках как на Колгуеве, так и на Болванском полуострове. Везде они приурочены к выпуклым вершинам небольших песчаных холмов. ***Псаммоземы*** были выделены на Болванском полуострове. Они также формируются на песчаных отложениях, но приурочены к более крупным пологим холмам. Описанные псаммоземы отличаются наличием подстилочно-торфяного горизонта мощностью до 8 см, слабыми признаками оглеения и отсутствием выраженного подзолистого или альфегумусового горизонта.

Торфяные олиготрофные и торфяные мезотрофные почвы присутствуют во всех районах и занимают слабо дренированные, подчиненные позиции в рельефе. Профиль этих почв состоит из чередования слоев торфа разного ботанического состава и степени разложения, что свидетельствует о том, что режим обводненности меняется достаточно часто в сравнении со скоростью аккумуляции торфа. *Торфяные олиготрофные типичные почвы* были выделены по преобладанию слабо разложенных остатков сфагновых мхов.

Для торфяных почв, находящихся в дренированных позициях (бугры; плоские поверхности, дренированные долинами) характерна небольшая глубина протаивания (30 см) и высокая степень разложения на торфяных буграх (*торфяные олиготрофные деструктивные мерзлотные*).

Глава 5. Криогенные микроструктуры почвенного покрова автономных позиций

На исследованных территориях выделено девять морфотипов криогенных микроструктур почвенного покрова (Рисунок 3). Они различаются по положению в ландшафте,

[2] содержание углерода органических соединений в верхнем протогумусовом горизонте составляет 3%

геометрическим формам поверхности, морфотипу, генезису, составу и контрастности компонентов, характеру генетической связи между ними.

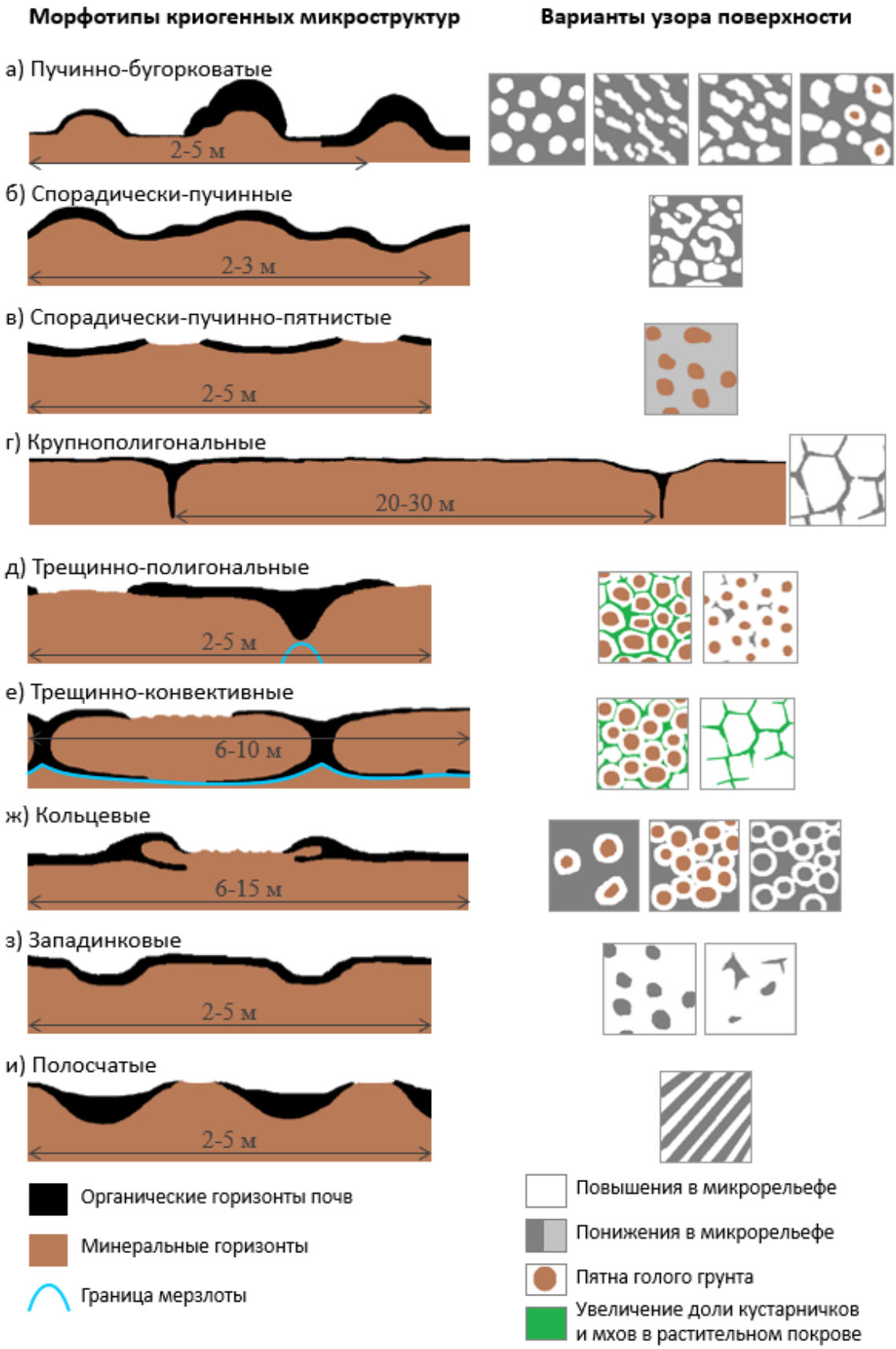

Рисунок 3 – Морфотипы криогенных микроструктур почвенного покрова и узоры их поверхности

Распространение криогенных микроструктур. Среди рассмотренных КМС только *пучинно-бугорковатые* и *трещинно-полигональные* ранее считались характерными для европейских типичных тундр [Атлас Арктики, 1985; Почвенная карта РСФСР, 1988], хотя в литературе можно найти упоминание и *крупнополигональных форм* микрорельефа [Игнатенко, 1979]. Теперь же список КМС, встречающихся в данном регионе, заметно расширен. Во-первых, за счет микроструктур, ранее описанных в других районах Арктики – *полосчатых* [Горячкин, 2010] и *спорадически-пучинно-пятнистых КМС* [Иванова, Полынцева, 1952]. Во-вторых, ряд микроструктур был впервые выделен в качестве самостоятельных морфотипов: *спорадически-пучинные, трещинно-конвективные, кольцевые* и *западинковые*. Следует отметить, что эти микроструктуры, почти все уже были описаны под другими названиями или без них в разных районах Арктики, однако не были охарактеризованы как самостоятельный морфотип КМС [Богдановская-Гиенэф, 1938; Смирнова, 1938; Игнатенко, 1972b; Матвеева, 1998; Губин, Лупачев, 2008; Лавриненко, Лавриненко, 2018; Van Vliet-Lanoe, Seppala, 2002; Ping et al., 2017].

Контрастность. Ранее для изученного региона были известны лишь контрастные криогенные микроструктуры, а между понятием «криогенная микроструктура почвенного покрова» и «криогенный комплекс» зачастую ставился знак равенства [Атлас Арктики, 1985]. Действительно, большинство из рассмотренных микроструктур обнаруживают высокую контрастность компонентов, которая возникает за счет криогенных трещин и/или пятен (*трещинно-полигональные, трещинно-конвективные* и *кольцевые* КМС), корразионных пятен (*спорадически-пучинно-пятнистые* и *полосчатые* КМС) или более торфяных и/или более глеевых почв бугорков (*пучинно-бугорковатые* КМС). При этом контрастность чаще всего связана с различиями в свойствах органических горизонтов, реже – минеральных или обоих (и органических, и минеральных горизонтов).

Тем не менее, было выявлено, что компоненты некоторых *пучинно-бугорковатых, крупнополигональных* и *спорадически-пучинных* микроструктур отличаются лишь на уровне отдельных признаков и, следовательно, в терминах теории структур почвенного покрова, такие КМС являются пятнистостями. В частности, слабой контрастностью обладают вновь формирующиеся пучинно-бугорковатые микроструктуры, поскольку при недавнем образовании микрорельефа почвенные горизонты, ранее находившиеся в одинаковых условиях, не сразу трансформируются в новых.

Несмотря на слабые различия между компонентами, описанные пятнистости обладают выраженным микрорельефом: бугорковатым, неупорядоченным (повышения и понижения не образуют регулярного узора) или полигональным (блоки, разделенные ложбинами). В то же время, в отдельных случаях, контрастный почвенный покров может иметь сглаженный микрорельеф поверхности (некоторые *трещинно-полигональные* и *трещинно-конвективные микроструктуры*). Неоднородность растительного покрова также не является надежным маркером контрастности почвенного покрова, так как может быть связана как с неоднородностью почвенных свойств, так и с микрорельефом. Таким образом, нет надежного критерия для выявления слабоконтрастных КМС, однако, можно выделить однозначные признаки комплексов: это пятна голого грунта, западинковый микрорельеф, полосы и полигоны с размерностью <10 м (Таблица 3).

Таблица 3 – Возможность прогноза контрастности почвенного покрова по характеру поверхности

Ландшафтный маркер (характер поверхности)	Пример микроструктуры	Контрастность микроструктур
Пятна голого грунта или пятна отличной растительности	• *Спорадически-пучинно-пятнистая* • *Кольцевая*	Только комплексы (контрастные КМС)
Полигоны <10 м, выраженные в микрорельефе и/или растительности	• *Трещинно-конвективная* • *Трещинно-полигональная*	
Западинки, выраженные в микрорельефе и неоднородности растительности	• *Западинковая*	
Полосы, выраженные в микрорельефе и неоднородности растительности	• *Полосчатая*	
Выраженный микрорельеф (более или менее упорядоченные повышения и понижения) и отсутствие других признаков	• *Пучинно-бугорковатая* • *Спорадически-пучинные*	И комплексы, и пятнистости
Крупные полигоны >10 м, выраженные в микрорельефе и/или растительности	• *Крупнополигональные*	

Характер связи между компонентами. Проведенный анализ разнообразия микроструктур почвенного покрова показывает, что характер генетической связи между их компонентами, как классификационными единицами, варьирует (Таблица 5): в ряде случаев в составе КМС можно выделить почву, строение профиля которой соответствует таковому в почвах соседних однородных участков почвенного покрова. То есть профиль этой почвы сформировался до появления и, соответственно, без влияния второго компонента микроструктуры: почвы бугорка, корразионного пятна, западинки или трещины.

Таблица 5 – Группы микроструктур, в зависимости от выраженности генетической связи между компонентами

«Истинные» комплексы и пятнистости	Микроструктуры с односторонней генетической связью
1. Трещинно-полигональные 2. Трещинно-конвективные 3. Полосчатые 4. Пятно с кольцом в кольцевых КМС 5. Некоторые пучинно-бугорковатые	<u>Фоновая почва с дырчатым ЭПА:</u> 1. Некоторые пучинно-бугорковатые 2. Спорадически-пучинно-пятнистые 3. Западинковые 4. Кольцевые
	<u>Фоновая почва оконтурена почвой 2:</u> • Крупнополигональные

Факторы формирования морфотипа КМС и их состава. Морфотип КМС – характерное расположение морфонов – является результатом действия криогенных процессов

(пучения, растрескивания, солифлюкции, неупорядоченных криотурбаций, пятнообразования, термокарста), приводящих к деформации почвенных горизонтов, их дифференцированному формированию и трансформации. Набор процессов, реализуемых на том или ином участке поверхности, определяется режимом увлажнения, промерзания и оттаивания данной почвы, что, в свою очередь, зависит от положения в рельефе (топографической дренированности и мощности снежного покрова) и состава почвообразующих пород, обладающих различной тепло- и влагопроводностью (Таблица 4).

Таблица 4 – Литолого-геоморфологическая приуроченность морфотипов криогенных микроструктур почвенного покрова

Рельеф	**Почвообразующие породы**			
	Суглинки средние и тяжелые	**Опесчаненные суглинки и супеси**	**Пески**	**Двучленные отложения**
Выпуклые вершины холмов до 5°	З, $К^1$	–	КП*	–
Выпуклые вершины холмов до 3°	ТП, П	–	КП?**	–
Выпуклые участки склонов до 2-3°	ТП, $К^2$	ПБ, $К^2$	КП?	
Водораздельные поверхности с уклоном до 1°	$К^3$	ПБ	КП	СП
Ровные и вогнутые склоны до 2°	ПБ, З	ПБ?	–	ПБ, СП
Плоские слабодренированные поверхности; Нижние части склонов; Ложбины	ПБ	ПБ?	ПБ	ПБ?
Прибровочные поверхности	СПП, З, ТК	ТК, СПП?	СПП	
Разнообразие КМС на данном типе отложений	**7**	**≥ 3**	**3**	**2**

Примечание. Морфотипы криогенных микроструктур:

З – западинковый;
К – кольцевой:
$К^1$ – группы отдельно расположенных 2-4 колец;
$К^2$ – кольца образуют сплошные скопления;
$К^3$ – разреженные скопления без пятен в центре; КП – крупнополигональный;
П – полосчатый;
ПБ – пучинно-бугорковатый;
СП – спорадически-пучинный;
СПП – спорадически-пучинно-пятнистый;
ТК – трещинно-конвективный;
ТП – трещинно-полигональный.

** Красным выделены микроструктуры, которые могут быть слабоконтрастными*
*** Со знаком вопрос указаны микроструктуры, которые не были описаны в данных условиях, но предположительно могут в них формироваться*

Пучинно-бугорковатые КМС имеют наиболее широкий ареал формирования: они описаны на всех типах пород и в довольно широком диапазоне условий увлажнения и дренированности. Соответственно, их состав имеет наибольшую вариабельность. В качестве компонентов пучинно-бугорковатых КМС были описаны: торфяно-криоземы, криометаморфические почвы и подбуры криометаморфические, глееземы, глееземы криометаморфические и торфяно-глееземы деструктивные.

Западинковые КМС описаны в разных элементах рельефа (от ровных поверхностей до выпуклых склонов), но – в отличии от пучинно-бугорковатых КМС – исключительно на суглинистых породах. Несмотря на литологическое ограничение, различия в условиях увлажнения и дренажа внутри этого ареала создают предпосылки для формирования широкого по степени гидроморфизма ряда почв: криоземы, криометаморфические почвы, глееземы криометаморфические и глееземы.

Крупнополигональные КМС приурочены к песчаным отложениям и автоморфным позициям, что ограничивает возможный набор почв, входящих в их состав, подзолами, подбурами оподзоленными и псаммоземами.

Для формирования спорадически-пучинно-пятнистых микроструктур необходимо положение в очень дренированной позиции рельефа, следовательно, почвообразование тоже ограничивается этим параметром: это исключает возможность формирования гидроморфных почв, однако остается возможным формирование практически любых автоморфных почв, поскольку ограничения по типу почвообразующих пород нет.

Формирование полосчатого, трещинно-полигонального, трещинно-конвективного и кольцевого морфотипа ограничено суглинистыми почвообразующими породами (суглинки) и по рельефу (автономные позиции различной степени дренированности). Это определяет то, что в их состав входят характерные для данной территории типы суглинистых автоморфных почв: криоземы и криометаморфические почвы.

Таким образом, связь между морфотипом и составом КМС существует, но опосредована через его литолого-геоморфологический ареал формирования: условия формирования морфотипа определяют его потенциальные компоненты, а широта диапазона условий формирования – разнообразие почвообразовательных процессов, которые могут реализоваться в его пределах: чем шире условия – тем больше вариантов состава для одного морфотипа мы можем наблюдать.

Глава 6. Организация почвенного покрова автономных позиций типичных тундр

Компоненты почвенного покрова. Почвенный покров холмистых ледниковых и ледниково-морских плейстоценовых равнин острова Колгуев и полуострова Болванский весьма различается по составу (Таблица 6). Тем не менее, глееземы нигде не занимают доминирующих позиций. Преобладание глеевых почв, представленных глееземами криометаморфическими в составе КМС, наблюдается лишь на относительно протяженных ровных склонах в восточной части Колгуева.

Таблица 6 – Преобладающие компоненты почвенного покрова автономных позиций

Ключевой участок		KH	B	KE	KC	L
ЭПА	Суглинки, в т. ч. опесчаненные	КМ (54%)	ПБкм (5%)	КМ (4%)	Гт (3%)	–
В составе КМС		КМ (20%)	Кз (20%) Г (12%)	Гкм (20%) КМ (15%) Г (10%) Гт (7%)	ПБкм (50%) Гкм (22%)	–
ЭПА	Пески и супеси	ПБ	Кз (13%)	ПБ (2%)	ПБ (9%)	По+Пот (35%)
В составе КМС		–	Пс (6%)	ПБ+По	Пс (2%)	ПБ+По (60%)

Примечание: Г – глееземы; Гкм – глееземы криометаморфические; Гт – торфяно-глееземы; Кз – криоземы; КМ – криометаморфические почвы; ПБ – подбуры; ПБкм – подбуры криометаморфические; По – подзолы; Пот – торфяно-подзолы; Пс – псаммоземы

Почвенный покров прибрежных ландшафтов голоценовых морских террас, согласно картографическим данным [Атлас Арктики, 1985; Почвенная карта РСФСР, 1988], должен был быть представлен в значительной мере комплексами с участием глееземов и торфяно-глеевых почв. По нашим же данным, в автономном почвенном покрове здесь велика доля альфегумусовых почв, в то время как глеевые почвы представлены крайне слабо (Таблица 6).

Участие КМС в составе почвенного покрова. Ранее предполагалось [Фридланд, 1984; Горячкин, 2010], что для тундровых ландшафтов свойственен тип почвенного покрова с преобладанием контрастных микроструктур, а ареалы относительно однородного почвенного покрова связаны с местами распространения песчаных отложений и подбуров на них [Государственная Почвенная Карта…, 1982; Почвенная карта РСФСР, 1988; Национальный атлас почв…, 2011]. Полученные в настоящей работе результаты показывают, что только в двух из пяти ключевых участков наблюдается преобладание комплексов в почвенном покрове автономных поверхностей (Таблица 7). При этом почвенный покров с низкой долей комплексов может формироваться не только на песчаных отложениях (острова Печорской губы), но и на суглинистых отложениях, а основным компонентом почвенного покрова будут выступать ЭПА криометаморфических почв (возвышенная часть Колгуева), либо подбуры криометаморфические в составе пучинно-бугорковатых пятнистостей (центральная часть Колгуева).

Таблица 7 – Соотношение распространенности морфотипов микроструктур почвенного покрова автономных позиций по районам исследования

Район исследования	**Колгуев, возвышен-ность**	**Болван-ский**	**Колгуев, восток**	**Колгуев, центр**	**Ловецкий**
КМС \ **Ключевой участок**	**KH**	**B**	**KE**	**KC**	**L**
Пучинно-бугорковатые комплексы	5%	–	**36%**	20%	–
Спорадически-пучинные комплексы	–	–	4%	–	–
Спорадически-пучинно-пятнистые комплексы	7%	–	–	4%	–
Крупнополигональные комплексы	–	6%	–	–	–
Трещинно-полигональные комплексы	–	**66%**	–	–	–
Трещинно-конвективные комплексы	–	–	22%	–	–
Кольцевые комплексы	0.5%	–	23%	–	–
Западинковые комплексы	**14%**	–	1%	–	–
Полосчатые комплексы	6%	–	–	–	–
Пучинно-бугорковатые пятнистости	12%	–	2%	**62%**	6%
Крупнополигональные пятнистости	–	–	+*	–	**59%**
Доля комплексов	32%	**72%**	**86%**	24%	0%
Доля пятнистостей	12%	0%	2%	**62%**	**65%**
Доля ЭПА	**56%**	28%	12%	14%	35%
Число типов КМС	**5**	**2**	**6**	**2**	**2**

*****Знаком плюс отмечены КМС, описанные за пределами ключевого участка, но в том же ландшафте

Наиболее распространенными КМС, встречающимися на всех территориях, являются *пучинно-бугорковатые* микроструктуры, что и ожидалось по литературным и картографическим данным [Атлас Арктики, 1985; Почвенная карта РСФСР, 1988]. Это

согласуется с тем, что для их формирования, в основе которого лежит процесс пучения, необходимо достаточное увлажнение, чему благоприятствует климат региона. Однако не во всех изученных ландшафтах *пучинно-бугорковатые* микроструктуры являются доминирующим морфотипом, уступая по площади *западинковым* микроструктурам в возвышенной части Колгуева, *трещинно-полигональным* – на Болванском полуострове и *крупнополигональным* – на острове Ловецком. Ограниченное распространение *трещинно-полигональных КМС* (Таблица 7), ранее также считавшихся характерными для европейских типичных тундр [Атлас Арктики, 1985; Почвенная карта РСФСР, 1988], можно объяснить относительно мягким климатом западной части типичных тундр ЕТР по сравнению с восточными районами и меньшей активностью криогенного трещинообразования.

Сопоставление состава почвенного покрова и геолого-геоморфологических характеристик территории. Для исследованных ландшафтов, наибольшее влияние на состав КМС в почвенном покрове автономных поверхностей оказывают характеристики состава почвообразующих пород. Так, для ландшафтов, на которых преобладают суглинистые отложения или присутствуют различные почвообразующие породы, более вероятно формирование большого разнообразия КМС. При этом на поверхностях, сложенных суглинками, более вероятно преобладание контрастных КМС, так как большинство морфотипов, формирующихся на них, обладают высокой контрастностью. Для автономных позиций ландшафтов с преобладанием легких отложений и, в особенности, если это молодые голоценовые ландшафты, весьма вероятно низкое разнообразие морфотипов и их низкая контрастность.

Особенности рельефа – отличия в крутизне склонов на 2°, их форме и длине (40-400 м) – слабо влияют на качественный и количественный состав почвенного покрова. Некоторое влияние оказывает только присутствие эрозионных врезов или локальных выпуклых форм рельефа, для которых свойственно развитие специфичных для них контрастных микроструктур – спорадически-пучинно-пятнистых и трещинно-конвективных. Их присутствие повышает разнообразие и долю комплексов в почвенном покрове.

Глава 7. Динамика почвенного покрова плакоров

Увеличение среднегодовых температур и сокращения осадков приводят к изменениям в растительном покрове [Белоновская и др., 2016; Beamish et al., 2020; Heijmans et al., 2022; Lavrinenko, Lavrinenko, 2022; Lavrinenko, Tyusov, Petrovsky, 2022]: увеличению, а иногда и снижению интенсивности вегетации некоторых растительных сообществ, а также изменению их площади [Phoenix, Bjerke, 2016; Bhatt et al., 2017; Lara et al., 2018; Fu et al., 2019]. На территории острова Колгуев также выявлены тренды ландшафтных изменений (Рисунок 4).

Переход из класса лишайниковых в класс бугорковатых тундр (Рисунок 4 а), по-видимому, связан с увеличением вегетации в ландшафтной фации бугорковатых мохово-лишайниковых тундр на опесчаненных суглинках. В почвенном покрове это пучинно-бугорковатые пятнистости с криометаморфическими глееватыми грубогумусированными почвами в составе, для которых не предполагается существенных изменений в ответ на большую интенсивность вегетации растительности.

Переход из класса лишайниковых в класс кустарничково-моховых тундр (Рисунок 4 б) может быть интерпретирован как увеличение сомкнутости растительного покрова, связанное в

том числе с сокращением площади корразионных пятен, и соответственно, спорадически-пучинно-пятнистых микроструктур и гомогенизации почвенного покрова.

Наиболее ярко выраженный тренд зарастания осоковых ложбин ивняками (Рисунок 4 в), вероятно, связан с изменением водного режима и приводит к активизации процессов пучения и формированию новых пучинно-бугорковатых микроструктур слабой контрастности, что свидетельствует об увеличении неоднородности почвенного покрова на микроуровне.

Переход из класса осоковых сообществ в класс кустарничково-моховых тундр (Рисунок 4 г) связан с общим снижением интенсивности вегетации, что в почвенном покрове может выражаться в активизации пятнообразования в трещинно-полигональных структурах – увеличением доли лишенных растительности поверхностей. Таким образом, трансформация приводит к большей комплексности почвенного покрова.

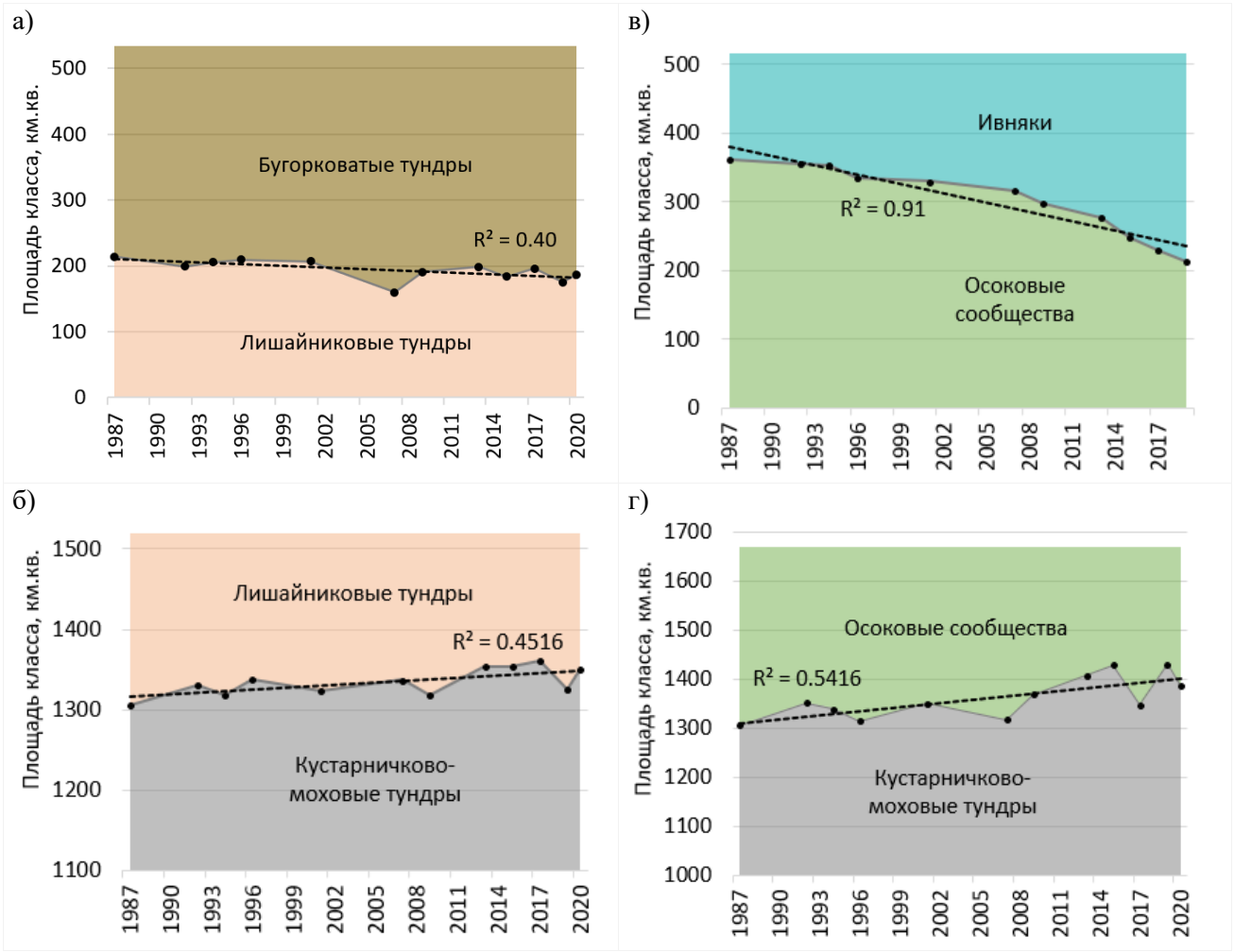

Рисунок 4 – Значимые переходы между ландшафтными классами: а) из лишайниковых в бугорковатые тундры; б) из лишайниковых в кустарничково-моховые тундры; в) из осоковых сообществ в ивняки; г) из осоковых сообществ в кустарничково-моховые тундры

Выводы

1. Для анализа КМС был предложен подход, учитывающий особенности криогенных микроструктур: геометрическое строение рассматривается независимо от генезиса, и отдельно – морфотип КМС – взаиморасположение морфонов и горизонтов в почвенной траншее или серии разрезов, отражающее объемную организацию почвенного покрова.

2. В подзоне типичных тундр выявлены почвы, ранее описанные в других холодных регионах: криометаморфические почвы и криоземы, а также подзолы, ранее описанные на южной границе подзоны. Вследствие нарушения криотурбациями подзолистый горизонт подзолов часто стирается, что переводит почвы в тип подбуров оподзоленных и определяет их доминирование в качестве почв на песках.

3. На территории подзоны типичных тундр ЕТР выделено девять морфотипов микроструктур. Помимо *пучинно-бугорковатых, трещинно-полигональных и крупно-полигональных микроструктур* впервые в этой подзоне детально описаны *спорадически-пучинно-пятнистые и полосчатые микроструктуры*. Впервые выделены и охарактеризованы как самостоятельный морфотип *спорадически-пучинные, трещинно-конвективные, кольцевые и западинковые микроструктуры*.

4. Примерно в половине из рассмотренных микроструктур в их составе можно выделить почву, профиль которой сформировался до появления и, соответственно, без влияния второй почвы: почвы бугорка, корразионного пятна, западинки или трещины. В таких микроструктурах генетическая связь между их компонентами, как классификационными единицами, односторонняя.

5. Установлено, что разные морфотипы КМС имеют разный диапазон условий формирования: так, на изученной территории, пучинно-бугорковатые микроструктуры формируются в наиболее широком диапазоне литолого-геоморфологических условий, в то время как другие микроструктуры проявляют более узкую приуроченность: их распространение ограничено определенным типом отложений или положением в рельефе или сочетанием обоих факторов.

6. Узкая приуроченность ограничивает набор почвообразовательных процессов, приводя к однообразию состава; широкий диапазон условий, напротив, допускает различные комбинации почв. Это свидетельствует о том, что криогенные деформации, задающие морфотип, и почвообразовательные процессы, формирующие почвенные горизонты, в значительной степени независимы, а их совместное проявление определяется тем, насколько совпадают условия их формирования.

7. Молодые, недавно сформированные пучинно-бугорковатые микроструктуры обладают слабой контрастностью. Это определяется тем, что горизонты бугорка, недавно оказавшиеся приподнятыми над окружающей поверхностью, не полностью трансформировались в новых условиях и близки по свойствам к исходной фоновой почве.

8. Наличие пятен голого грунта, западинок, полос или полигонов с размерностью <10 м – однозначно свидетельствует о комплексном почвенном покрове. Наличие выраженного микрорельефа или полигонов размером >10 м – не указывает на контрастность микроструктуры.

9. Для почвенного покрова автоморфных поверхностей голоценовых морских террас, сложенных легкими отложениями, свойственно низкое разнообразие морфотипов и их низкая контрастность. Для территорий с участием суглинистых отложений в составе почвообразующих пород более вероятно высокое разнообразие КМС и преобладание в составе почвенного покрова их контрастных форм.

10. Анализ динамики структуры ландшафтов Колгуева указывает на разнонаправленные климатически-обусловленные изменения в почвенном покрове: его гомогенизацию в результате сокращения площади спорадически-пучинно-пятнистых микроструктур, и, в то же время, увеличение комплексности вследствие активизации пятнообразования в трещинно-полигональных структурах. Наиболее ярко выражен тренд зарастания осоковых ложбин ивняками, что говорит о потенциальном образовании новых пучинно-бугорковатых микроструктур слабой контрастности.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в Белый список и базы данных Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете ИГРАН 24.1.049.04 по специальностям 1.6.12:

1. Шматова, А. Г. Криогенные микроструктуры почвенного покрова подзоны типичных тундр Европейской территории России / А. Г. Шматова, С. В. Горячкин // Почвоведение. – 2025. – № 12. – С. 1752-1768. DOI: 10.7868/S3034561825120073

2. Шматова, А. Г. Разнообразие почв острова Колгуев с криометаморфическими горизонтами / А.Г. Шматова, В. А. Лобков // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2024. – № Специальный выпуск по материалам VII конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2023”. – С. 5-36. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-SPYC-5-36

3. Остров Колгуев как объект мониторинга биоты западного сектора российской Арктики / П.М. Глазов, Ю.А. Лощагина, А.Г. Шматова, А.Е. Гнеденко, А.А. Тишков // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 261-273. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-261-273.

4. Шматова, А. Г. Анализ временной серии снимков Landsat для выявления климатически обусловленных изменений в структуре ландшафтов острова Колгуев / А.Г. Шматова, Ю.А. Лощагина, П.М. Глазов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – № 4. – С. 149-164.

5. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки / А.А. Тишков, Е.А. Белоновская, П.М. Глазов, А.Н. Кренке, С.В. Титова, Н.Г. Царевская, А.Г. Шматова // Арктика: экология и экономика. – 2019. – Т. 36. – № 4. – С. 38-51. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-38-51

Список сокращений

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

ГИС – геоинформационные системы

ЕТР – Европейская территория России

КМС – криогенные микроструктуры почвенного покрова

ППП – потеря при прокаливании

ПП – проективное покрытие

СПП – структура почвенного покрова

ЭПА – элементарный почвенный ареал