

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ВАН ВЭНЬЦЗЮАНЬ

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И
МЕТАЛЛОИДОВ В КРИОГЕННЫХ ПОЧВАХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ
ЯМАЛЬСКОГО РЕГИОНА И ЦИНХАЙ-ТИБЕТСКОГО ПЛАТО**

1.5.19. Почвоведение (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Научный руководитель: **Абакумов Евгений Васильевич**,
доктор биологических наук, профессор РАН,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет», кафедра прикладной экологии,
профессор.

Официальные оппоненты: **Пастухов Александр Валериевич**,
доктор биологических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Федерального исследовательского центра «Коми
научный центр Уральского отделения Российской
академии наук», Институт биологии, отдел
почвоведения, старший научный сотрудник;

Лаврищев Антон Викторович,
доктор сельскохозяйственных наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный аграрный
университет», кафедра почвоведения и агрохимии
имени Л.Н. Александровой, заведующий.

Защита диссертации состоится **«26» марта 2026 г. в 15:30** на заседании
диссертационного совета ЮФУ801.01.13 по биологическим наукам на базе Академии
биологии и медицины им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета по
адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, к. 5

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А.
Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул.
Р. Зорге, 21Ж и на сайте Южного федерального университета
<https://hub.sfedu.ru/diss/show/1347057/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО, учёной степени
со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона,
e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090,
г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 707, ученому секретарю диссертационного совета
ЮФУ801.01.13 Бурачевской М.В., а также в формате .pdf на e-mail:
mburachevskaya@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.б.н.



Бурачевская Марина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Криогенные почвы являются важнейшей составной частью криосферы и под влиянием изменения климата подвергаются деградации, а также испытывают усиление отдельных биохимических процессов (Street, Melnikov, 1990; Abbott et al., 2015; Schuur, Mack, 2018). Распределение криогенных почв занимает около 16% площади суши земного шара (Obu et al., 2019; Zhang et al., 2008). Криогенные почвы могут служить основным резервуаром углерода и металлов, и оказывают существенное влияние на криогенные экосистемы (Schuster et al., 2018; Lim et al., 2022). В условиях глобального потепления деградация криогенных почв сопровождается образованием термокарста, солифлюкции и т. д., что может приводить к высвобождению ранее законсервированных веществ в мерзлоте (Farquharson et al., 2019; Таргульян В.О., 2005; Miner et al., 2022). Особое внимание уделяется высокоширотным и высокогорным регионам, где темпы потепления примерно в полтора-два раза превышают среднемировые значения, что делает эти территории ключевыми для изучения деградации криогенных почв (Haeberli, Gruber, 2009; Крыленков, Гончаров, 2019).

В настоящее время тяжёлые металлы и металлоиды (ТММ) техногенного происхождения были обнаружены не только в городах, но и в таких удалённых регионах, как Арктика, Антарктида и Цинхай-Тибетское плато (Karnaeva et al., 2021; Potarowicz et al., 2019; Sheng et al., 2012). Атмосферный перенос ТММ и их аккумуляция в криогенных почвах становятся важной проблемой экологической безопасности (Tripathee et al., 2014; Jiao et al., 2021). Между тем, деградация криогенных почв может приводить к увеличению мобильности ТММ (Pokrovsky et al., 2011; Loiko et al., 2017), что может угрожать окружающей природной среде и здоровью населения (Potarowicz et al., 2019; Miner et al., 2021). Однако, систематическое сравнительное исследование распределения содержания многочисленных ТММ в криогенных почвах центральных частей Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато почти не проводилось.

Ямальский регион и Цинхай-Тибетское плато являются типичными представителями высокоширотных и высокогорных регионов распространения криогенных почв и многолетнемерзлых пород. Территория распространения криогенных почв и пород занимает до 65% площади России, в частности значительная их часть находится на Ямале, где сосредоточено более 70% российских запасов газа (Опекунова и др., 2019; Fedorov et al., 2021). В то же время Цинхай-Тибетское плато известно как «Третий полюс», «Крыша мира», «Водонапорная башня Азии» и оказывает влияние на устойчивое и безопасное водоснабжение миллиардов людей в Азии и прилегающих районах (Immerzeel et al., 2010; Yao et al., 2012). Изучение криогенных почв в этих двух регионах имеет огромное значение для экологической безопасности региональных территорий и для понимания глобальных изменений в криосфере.

Изучение уровней накопления углерода и азота в криогенных почвах необходимо для полного понимания процессов мобилизации и фиксации ТММ (Mauclet et al., 2022; Monhonval et al., 2022). Взаимосвязь между соединениями углерода, азота и ТММ в процессе деградации криогенных почв в условиях изменяющегося климата остаётся не до конца изученной. Таким образом, анализ распределения содержания ТММ в криогенных почвах в этих двух регионах, и исследование изменений содержания углерода, азота и ТММ, связанных с процессом деградации криогенных почв, могут предоставить ценные новые данные для экологического мониторинга криосферы.

Цель исследования: исследование распределения содержания ТММ в криогенных почвах центральных частей Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато, и влияния деградационных процессов на почвенные свойства Цинхай-Тибетского плато.

Задачи исследований:

- (1) проанализировать распределение содержания ТММ в криогенных почвах центральной части Ямальского региона;
- (2) определить распределение содержания ТММ в криогенных почвах центральной части Цинхай-Тибетского плато;
- (3) выявить различия в распределении содержания ТММ в криогенных почвах центральных частей Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато;
- (4) оценить влияние процесса деградации криогенных почв на динамику содержания органического углерода, общего азота и ТММ в почвах термокарстовых районов Цинхай-Тибетского плато.

Положения, выносимые на защиту.

1. В почвенных профилях центральной части Ямальского региона распределение содержания ТММ связано с содержанием органического углерода и общего азота, типом почвы (агродерново-подбуры иллювиально-железистые) и воздействием антропогенной деятельности (технотурбации). В центральной части Цинхай-Тибетского плато оно обусловлено типом растительного покрова. Основными источниками ТММ в криогенных почвах двух мест исследования являются почвообразующие породы, атмосферный перенос и транспорт, с дополнительным влиянием предыдущей сельскохозяйственной деятельности в центральной части Ямальского региона.

2. Криогенные почвы центральной части Ямальского региона находятся в практически незагрязнённом состоянии, в то время как в криогенных почвах Цинхай-Тибетского плато концентрации Hg и Cd представляют потенциальные экологические риски. Это может быть связано с тем, что почвы в центральной части Ямальского региона преимущественно характеризуются лёгким гранулометрическим составом, с низкой способностью к накоплению металлов. Регион Цинхай-Тибетского плато подвержен воздействию Индийского муссона и западных ветров, которые переносят ТММ из районов с антропогенной нагрузкой,

что приводит к аккумуляции загрязняющих веществ.

3. Процесс деградации криогенных почв изменяет рельеф, гидрологические параметры почвы, окислительно-восстановительные условия, степень минерализации соединений углерода и выраженность процесса криогенного массообмена. Fe и Mn могут быть использованы в качестве геохимических индикаторов деградации криогенных почв. Значительное снижение концентраций ТММ на третьей стадии деградации, характеризующейся медленным развитием солифлюкции криогенных почв, может ослабить их способность к аккумуляции, соосаждению и хелатированию с органическим веществом, тем самым снижая степень стабилизации органо-минеральных соединений.

Научная новизна. Получены данные о содержании органического углерода, общего азота и ТММ в криогенных почвах высокоширотного Ямальского региона и высокогорного Цинхай-Тибетского плато. Впервые проведён детальный анализ распределения многочисленных химических элементов в криогенных почвах центральной части Цинхай-Тибетского плато. Выявлены источники ТММ в криогенных почвах центральных частей Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато, а также проведён анализ потенциальных экологических рисков ТММ. Установлены закономерности между процессом деградации мерзлотных почв и циклами органического углерода, общего азота и ТММ в криогенных почвах в условиях изменяющегося климата.

Теоретическая и практическая значимость. Проведённые исследования могут послужить теоретической основой для последующих исследований изменения содержания ТММ в криогенных почвах центральных частей Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато. Результаты оценки потенциальных экологических рисков ТММ могут служить ориентиром для регионального экологического мониторинга. Выявленное влияние процесса деградации криогенных почв на содержание почвенного органического углерода, общего азота и ТММ может служить теоретической основой для дальнейших исследований биогеохимических процессов многолетнемёрзлых почв в условиях изменения климата. Результаты проведённого исследования могут быть использованы при подготовке лекций в рамках курсов «Почвоведение», «Экология», «Геохимия», «Криосфера Земли» и других смежных дисциплин.

Степень достоверности. Обоснованность и достоверность полученных результатов и сделанных выводов подтверждаются значительным объёмом экспериментальных данных и применением современных методов анализа. В ходе полевых экспедиций были заложены 21 разрез многолетнемёрзлых почв и отобраны 92 образца почвы с различных глубин. Применены современные лабораторные и статистические методы. Степень достоверности результатов подтверждается согласованностью полученных данных и высокой статистической значимостью выявленных зависимостей.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования были представлены на Всероссийской научной конференции «Проблемы криосферы Земли» (2025, Пущино), международной научно-практической конференции «Региональное сотрудничество БРИКС: современные проблемы экологии и природопользования» (2024, Петрозаводск), на Всероссийской научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в Антропоцене» (2023, Салехард-Лабытнанги, ЯНАО) и на III международной конференции «Биомониторинг в Арктике» (2022, Архангельск).

Публикации. Содержание диссертационного исследования изложено в 10 публикациях, в том числе в 5 статьях, опубликованных в изданиях, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Web of Science и/или Scopus, и в 1 статье в издании, включённом в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Работа была выполнена в период обучения в аспирантуре по основной образовательной программе «Экология. Биоразнообразие и охрана природы» на кафедре прикладной экологии биологического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. Автор принимал участие в постановке цели и задач, планировании научной работы совместно с научным руководителем, составлении обзора научной литературы. Автор провел полевые исследования почв в центральных частях Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато. Автор провел лабораторные исследования проб почв на кафедре прикладной экологии биологического факультета Санкт-Петербургского государственного университета и в Северо-Западном институте экологии и природных ресурсов Академии наук Китая. Автор обработал результаты анализов почв, провел интерпретацию и статистическую обработку полученных данных, написал текст диссертации и научные публикации по выполненной работе совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Структура и объём диссертации. Диссертация общим объёмом 149 страниц состоит из введения, трёх глав, выводов и списка литературы. Список литературы содержит 253 источника, из них 226 — на иностранном языке. Работа включает 24 рисунка и 15 таблиц.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.5.19. Почвоведение по п. 6. Теоретические и научно-методические вопросы химии почв. Изучение взаимодействия органических и минеральных компонентов почв. Техногенное и агрогенное химическое загрязнение почв, изменение их естественной кислотности, химического состава и физико-химических свойств; по п. 10. Почва в глобальном круговороте углерода и других биогенных элементов. Почва как источник и поглотитель парниковых газов. Трансформация почв под действием изменений климата.

Финансовая поддержка исследования. Работа была поддержана грантами России и Китая, соответственно: Российским научным фондом (№ 24-44-00006), НЦМУ «Агротехнологии будущего» договор № 075-15-2022-322 от 22.04.2022, Китайскими научными фондами (№ 32361133551 и № 41941015) и Китайским стипендиальным советом (№ 201907010003).

Благодарности. Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность научному руководителю, профессору, заведующему кафедрой прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета, д.б.н. Е.В. Абакумову за его неоценимую, всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах выполнения диссертационной работы.

Автор благодарит Т.И. Низамутдинова и А.С. Печкина за их помощь в проведении полевых исследований в центральной части Ямальского региона. Автор также выражает признательность Gensheng Li, Xiaowen Ji и В.И. Полякову за их полезные предложения по данной научно-исследовательской работе. Кроме того, автор выражает сердечную благодарность преподавателям и коллегам (М.А. Надпорожской, Д.А. Дубовикову, Е.Ю. Чебыкиной, И.И. Подлипскому, И.Д. Кушнову, Wei Liu и др.) за их поддержку, помощь и комментарии в ходе выполнения научной работы.

Одновременно, автор выражает глубокую благодарность профессору Xiaodong Wu и другим китайским коллегам (Xiaofan Zhu, Jie Chen, Tonghua Wu, Sizhong Yang, Cuicui Mu, Haiyan Xu, Guimin Liu, Dong Wang, Xuchun Yan, Binyan Liang и др.) за их неоценимую помощь в проведении полевых и лабораторных работ по Цинхай-Тибетскому плато. Их экспертиза, знания и преданность существенно способствовали успешному выполнению диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ НАУКИ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В КРИОГЕННЫХ ПОЧВАХ

Представлен обзор современных научных достижений в области изучения ТММ в криогенных почвах циркумполярных регионов и Цинхай-Тибетского плато. Рассмотрены распределение содержания ТММ, источники их поступления, а также потенциальные экологические риски в криогенных почвах указанных районов. Проанализировано влияние изменения климата и антропогенной деятельности на процессы аккумуляции и динамики ТММ в криогенных почвах.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены в криогенных почвах центральных частей Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато (рис. 1). В ходе трёх полевых экспедиций, проведённых в 2017, 2021 и 2022 годах, были заложены разрезы многолетнемёрзлых почв и отобраны образцы почвы. В центральной части

Ямальского региона площадки расположены в пределах координат от $65,34^\circ$ до $65,59^\circ$ с.ш. и от $72,07^\circ$ до $72,98^\circ$ в.д. с высотой от 10 до 38 м. В центральной части Цинхай-Тибетского плато площадки находятся в диапазоне координат от $34,22^\circ$ до $35,22^\circ$ с.ш. и от $92,44^\circ$ до $93,08^\circ$ в.д. с высотой от 4539 до 4770 м.

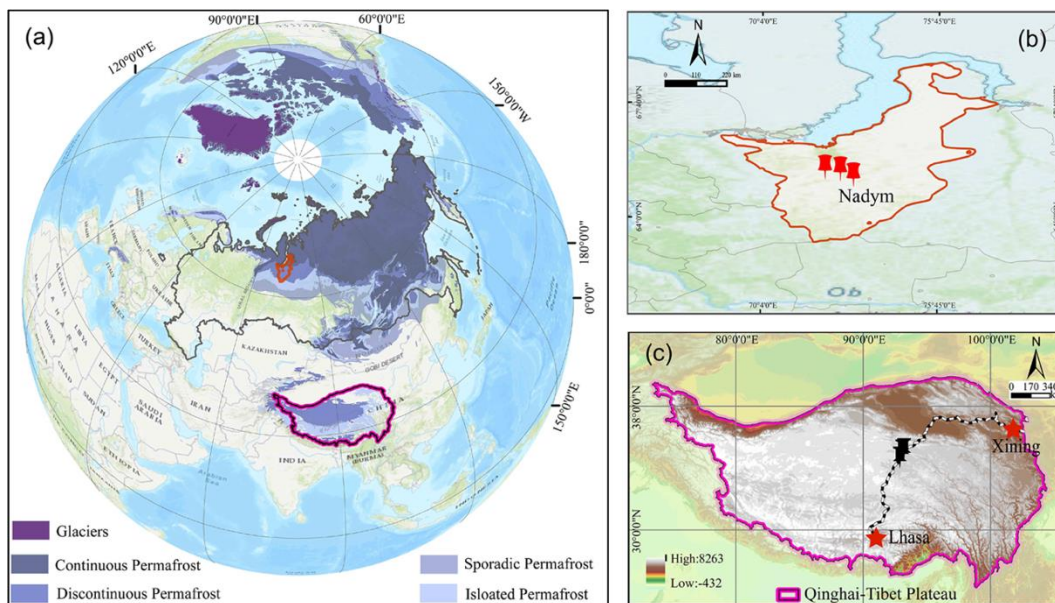


Рисунок 1 – Расположение исследуемых территорий

Примечание: (a) Часть карты мира; (b) Карта Надымского района в центральной части Ямальского региона; (c) Карта Цинхай-Тибетского плато.

Во-первых, три почвенных разреза были выкопаны в центральной части Ямальского региона. Почвенные пробы были отобраны из тундровых экосистем (TD), залежных агроэкосистем (AF) и городских экосистем (UA). Изображения почвенных разрезов этих трёх площадок представлены на рисунке 2. Почвы в центральной части Ямальского региона представлены преимущественно альфегумусовыми и торфяными отделами.

Во-вторых, в центральной части Цинхай-Тибетского плато на площадках FHS, KKXL и WDL было заложено 9 почвенных разрезов и собрано 45 образцов почв из слоёв на глубине 0–50 см с интервалом в 10 см. Фотографии почвенных профилей трёх площадок (FHS, KKXL и WDL) Цинхай-Тибетского плато представлены на рисунке 3. Были отобраны три репрезентативных ландшафта: альпийский влажный луг (FHS), альпийский луг (KKXL) и альпийская опустыненная степь (WDL). На территории Цинхай-Тибетского плато преобладают слаборазвитые и криогенные почвы (Li et al., 2015).

В-третьих, в октябре 2021 года пробы почв были отобраны из слоев 0–30 см с интервалом в 10 см на трёх этапах на четырёх солифлюкционных рельефах (WDL1, WDL2, FHS1 и HLH). Этапы деградации криогенных почв включали: 1 — фоновая почва, незатронутая солифлюкцией; 2 — начальная стадия солифлюкции, т.е. быстрый процесс солифлюкции, диагностируемый по очевидной деформации и перемещению почвогрунтов (обвалы, оползни, обрушения, просадки, трещины и т. д.) на склонах; 3 — финальная стадия солифлюкции, т.е. медленный процесс

солифлюкции, завершённый процесс перемещения почвогрунтов, сопровождающийся образованием оврагов, заиленной водой и обрушившегося дерна в низинах (рис. 4). Ландшафт относится к альпийским влажным лугам и альпийским лугам на площадках отбора проб в районе деградации криогенных почв.

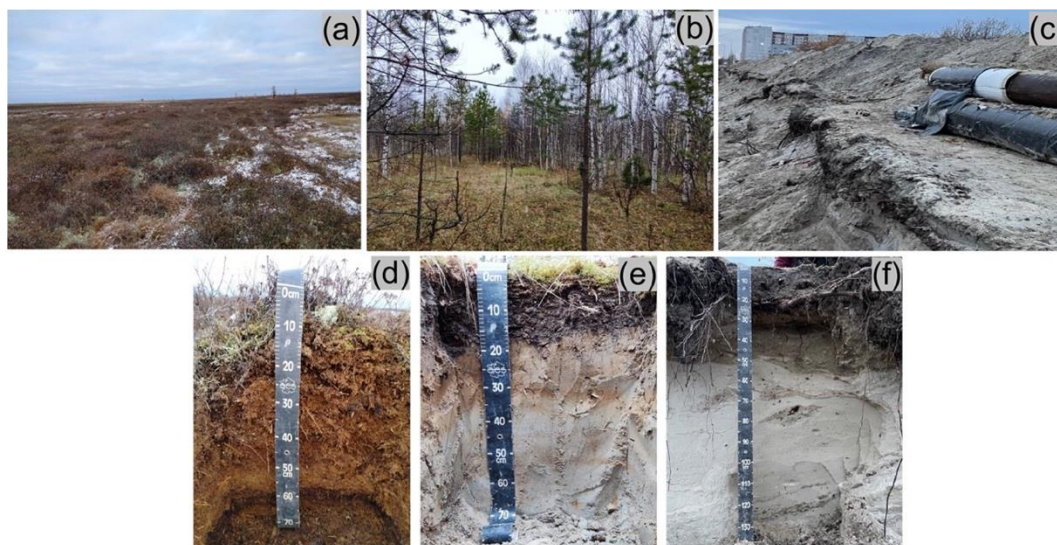


Рисунок 2 – Вертикальная организация почвенных профилей трёх площадок в центральной части Ямальского региона, изученных в октябре 2022 года
Примечание: (a, b, c) Фотографии трёх площадок отбора проб центральной части Ямальского региона (TD, AF и UA); (d, e, f) Фотографии почвенных профилей трёх площадок отбора проб центральной части Ямальского региона (TD, AF и UA).

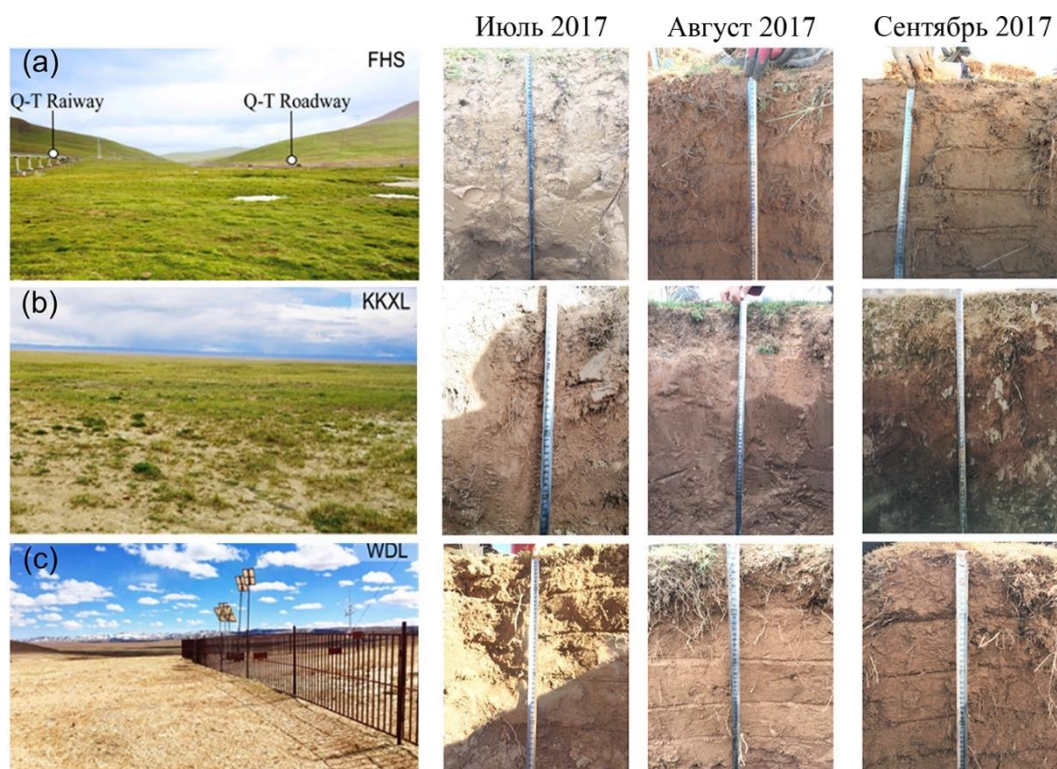


Рисунок 3 – Почвенное разнообразие трёх изученных площадок (FHS, KKXL и WDL) на многолетнемёрзлых породах Цинхай-Тибетского плато в июле, августе и сентябре 2017 года

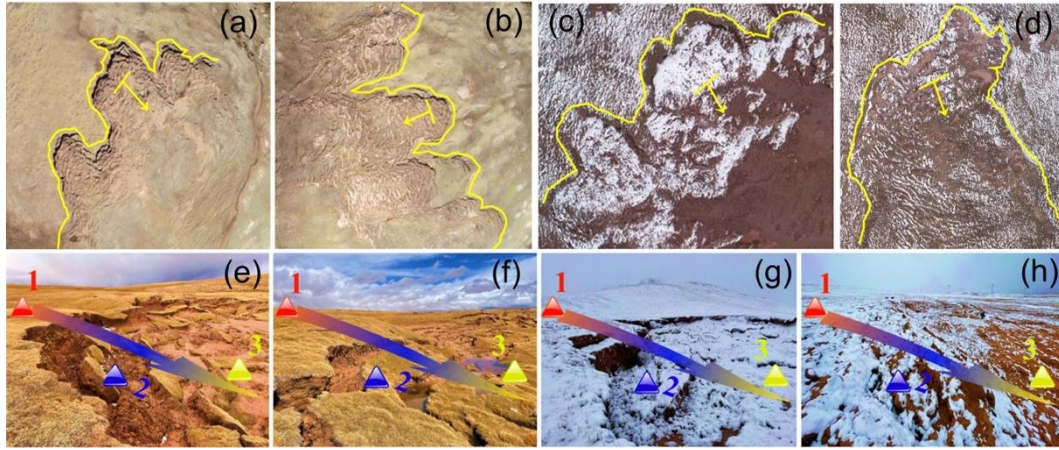


Рисунок 4 – Фотографии четырёх площадок отбора проб в районах деградации криогенных почв в центральной части Цинхай-Тибетского плато

Примечание: а и е: WDL1, b и f: WDL2, c и g: FHS1, d и h: HLH.

Жёлтая стрелка и кривая указывают область и направление деградации криогенных почв. Красный, синий и жёлтый треугольники представляют собой:

- 1 (фоновая почва, незатронутая солифлюкцией),
- 2 (начальная стадия солифлюкции, т.е. быстрый процесс солифлюкции) и
- 3 (финальная стадия солифлюкции, т.е. медленный процесс солифлюкции).

Для анализа почвенных образцов, отобранных в центральных частях Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато, применялись разнообразные лабораторные методы и оборудование, соответствующие конкретным условиям и техническим возможностям каждой лаборатории. Следует отметить, что, для корректного сравнения некоторых параметров почв двух регионов были применены пересчётные формулы (Шеин Е.В., 2009), пересчётные коэффициенты (Шамрикова и др., 2022) и эталонные образцы, чтобы обеспечить сопоставимость данных.

Все пробы почв, отобранных в центральной части Ямальского региона, хранились в полиэтиленовых пакетах, а затем были доставлены в лабораторию кафедры прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета. Величину водородного показателя (рН) в водной суспензии измеряли с помощью рН-метра рН-150М (Беларусь). Для определения гранулометрического состава почв был использован седиментометрический метод, основанный на законе Стокса по методу Шеина Е.В. (2005). Содержание органического углерода почвы определяли с помощью косвенных методов мокрого сжигания, которые включали объемный учет окислителя согласно методике И.В. Тюрина в модификации кафедры почвоведения СПбГУ (Растворова и др., 1995). Содержание общего азота почвы измеряли по методу Кьельдаля, следуя национальному стандарту РФ ГОСТ Р 58596—2019. Валовое содержание ТММ в образцах почв, отобранных в Надымском районе ЯНАО, определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии с использованием спектрофотометра Kvant 2 M (Москва, Россия, 2021) в соответствии с национальными стандартами

РД 52.18.685–2006, РД 52.18.721–2009, ПНД Ф 16.1:2.3:3.10–98 и руководством по химическому анализу почв (Аринушкина Е.В., 1970).

Пробы почвы из центральной части Цинхай-Тибетского плато хранились в полиэтиленовых пакетах и алюминиевых бьюксах, а затем были доставлены в лабораторию Северо-Западного института экологии и природных ресурсов Академии наук Китая. рН измеряли с помощью рН-метра PHS-3E. Гранулометрический состав почв определяли с использованием лазерного дифрактометрического анализатора (Malvern Mastersizer 3000, Великобритания). Общий углерод и органический углерод почвы определялись по методике высокотемпературного сжигания с помощью автоматического анализатора углерода (Elementar Vario TOC Select, Германия). Общий азот почвы определяли с использованием автоматического анализатора Foss (Foss-8400, Швеция). ТММ в центральной части Цинхай-Тибетского плато в основном определяли на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7700x, США). В том числе для элементов с низкими концентрациями Cd измеряли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (PinAAcle 900T, США), Hg и As были определены методом атомной флуоресцентной спектроскопии (AFS-9710, Китай).

Индекс геоаккумуляции (I_{geo}), коэффициент обогащения (EF), индекс степени загрязнения (PLI), модифицированная степень загрязнения (mC_d) и индекс потенциального экологического риска (RI) использовались для полной оценки состояния загрязнения ТММ (Zn, As, Cr, Ni, Cu, Pb, V, Co, Cd и Hg) в криогенных почвах центральных частях Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато. Тест Шапиро Уилка был использован для проверки нормального распределения данных. Однофакторный дисперсионный анализ ANOVA (Least Significant Difference, Bonferroni и Tamhane's T2) использовался для данных нормального распределения, а непараметрический статистический метод (Kruskal Wallis H test) применялся к данным ненормального распределения. Коэффициент корреляции Пирсона, модель Positive Matrix Factorization (PMF), анализ главных компонент и кластерный анализ были проведены для выявления сходных источников среди ТММ. В то же время регрессионный анализ позволил выявить специфическое влияние процесса деградации криогенных почв на содержание органического углерода, общего азота и ТММ в почвах термокарстовых рельефов Цинхай-Тибетского плато. Модель Random forest (RF) была применена для определения относительной важности различных факторов, влияющих на содержание органического углерода, общего азота и ТММ в почвах, с использованием пакета tidymodels в R. Кроме того, для изучения прямого и косвенного влияния процесса деградации криогенных почв на содержание органического углерода, общего азота и ТММ в почвах использовалась модель Partial least squares path modeling (PLS-PM).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Распределение содержания тяжёлых металлов и металлоидов в криогенных почвах центральной части Ямальского региона

Содержания органического углерода и общего азота в криогенных почвах центральной части Ямальского региона относительно высокие. Среднее значение содержания органического углерода почвы на трёх площадках отбора проб составило 3,25%, среднее значение содержания общего азота почвы — 0,17%. Величины рН в почвах трёх площадок составили $6,06 \pm 0,47$, являются слабокислыми. Пробы почв трёх площадок содержат высокую долю песчаных частиц $64,81 \pm 20,92\%$.

Концентрации ТММ в криогенных почвах центральной части Ямальского региона представлены на рисунке 5. Результаты показывают, что Cr, Ni, Cu, Pb и Hg характеризовались высокими концентрациями в горизонте АО почв тундры, что связано с высоким содержанием органического углерода и общего азота, способствующих их накоплению. В почвах залежи распределение Fe, Zn, Ni и Cu демонстрировало иллювиально-дифференциацию, что связано с типом почвы (агродерново-подбуры иллювиально-железистые). Повышенные концентрации Ni, Zn и Pb наблюдались в поверхностных горизонтах почв урбанизированных районов, что, вероятно, обусловлено антропогенной деятельностью (технотурбацией).

Основными источниками ТММ в криогенных почвах центральной части Ямальского региона являются почвообразующие породы, дальний атмосферный перенос, предшествующая сельскохозяйственная деятельность и транспорт (рис. б). Значение I_{geo} , EF, PLI, mC_d и RI в криогенных почвах трёх площадок центральной части Ямальского региона были низкими, что указало на то, что места отбора проб в центральной части Ямальского региона были практически незагрязнёнными.

В данном исследовании было проведено сравнение содержания ТММ в криогенных почвах Надымского района центральной части Ямальского региона и других циркумполярных регионов. Было обнаружено, что концентрации ТММ в почвах Надымского района центральной части Ямальского региона значительно ниже значений для других арктических и антарктических регионов. Это может быть связано с относительно низкой продолжительностью антропогенного воздействия в районе данного города и преобладанием песчаных почв, которые менее подвержены накоплению ТММ.

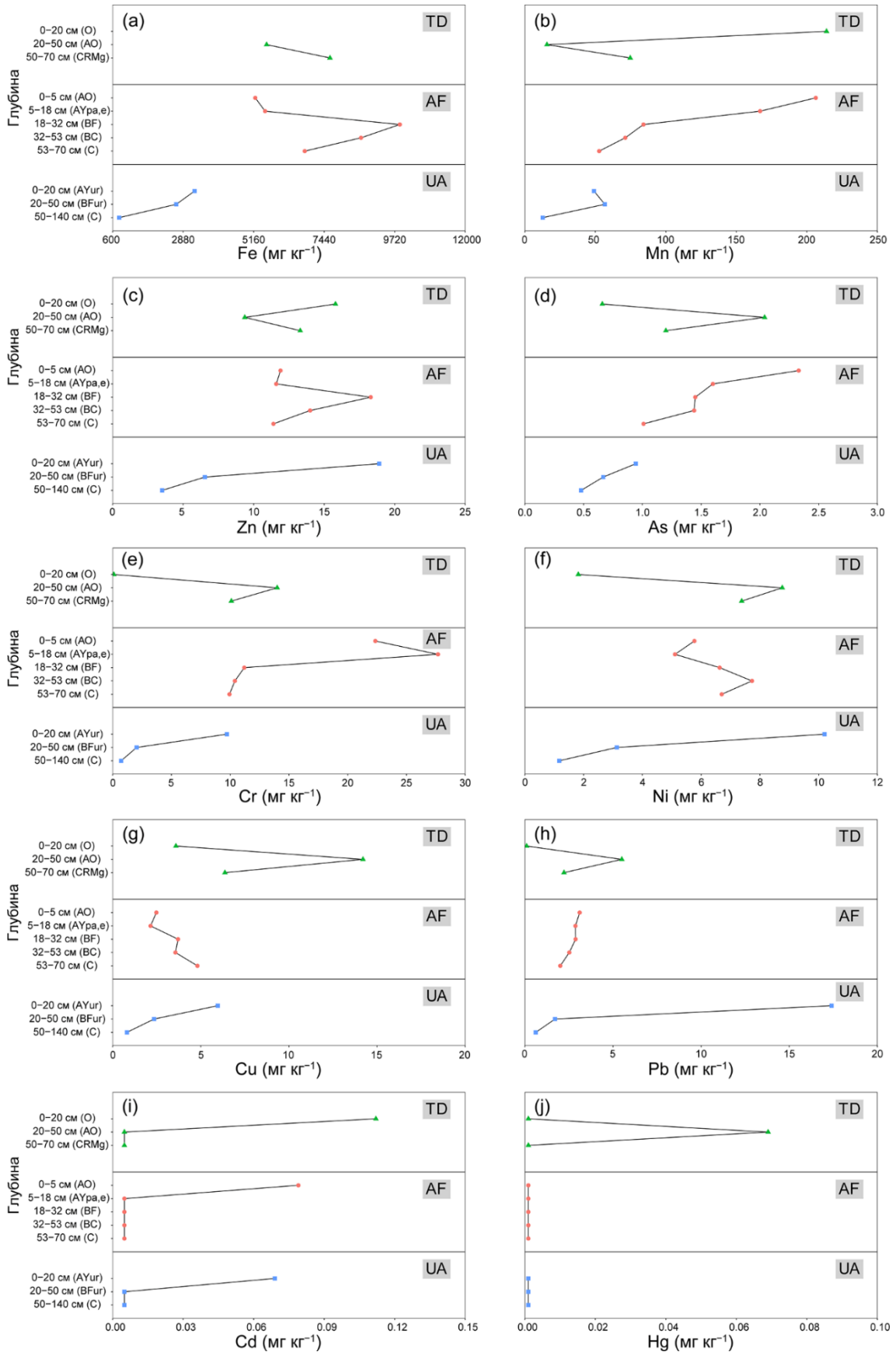


Рисунок 5 – Концентрации тяжёлых металлов и металлоидов (ТММ) (mg kg^{-1}) в криогенных почвах центральной части Ямальского региона
Примечание: TD – тундра; AF – залежь; UA – город.

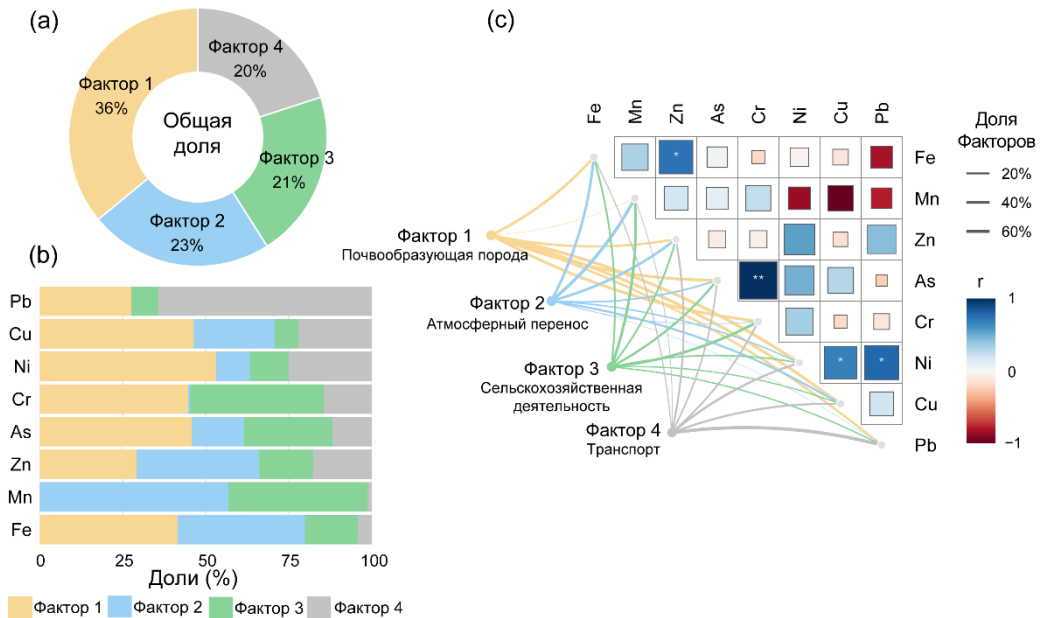


Рисунок 6 – Распределение источников тяжёлых металлов и металлоидов (ТММ) в криогенных почвах центральной части Ямальского региона

Примечание: (а) Доля каждого фактора по модели Positive Matrix Factorization (PMF). (б) Доля факторов для каждого ТММ на основе модели PMF.

(с) Корреляция Пирсона ТММ с результатами модели PMF,

** : $p < 0,01$ и * : $p < 0,05$.

3.2 Распределение содержания тяжёлых металлов и металлоидов в криогенных почвах центральной части Ямальского региона

Содержания органического углерода и общего азота в криогенных почвах центральной части центральной части Цинхай-Тибетского плато относительно низкие. Среднее значение содержания органического углерода почвы на трёх площадках отбора проб составило 0,97%, среднее значение содержания общего азота почвы — 0,09%. Значение рН почв на трёх площадках составило $8,51 \pm 0,02$, что соответствует слабощелочному диапазону. Пробы почв на трёх площадках содержат высокую долю пылеватой фракции — $73,27 \pm 3,45\%$.

Результаты предыдущих исследований показывают, что определение большего числа химических элементов способствует более детальному анализу их источников. Поскольку методика ICP-MS обеспечивает определение широкого спектра химических элементов, на Цинхай-Тибетском плато было измерено содержание 21 химического элемента. Распределение ТММ в почвенных профилях центральной части Цинхай-Тибетского плато обусловлено типом растительного покрова (рис. 7). При этом за исключением Cd и Hg, концентрация большинства ТММ в почвах альпийских влажных лугов была самой высокой, за ней следовали почвы альпийских лугов и почвы альпийских опустыненных степей в криогенных почвах Цинхай-Тибетского плато. Основными источниками ТММ в криогенных почвах центральной части Цинхай-Тибетского плато являются почвообразующая порода, атмосферный перенос и транспорт (рис. 8).

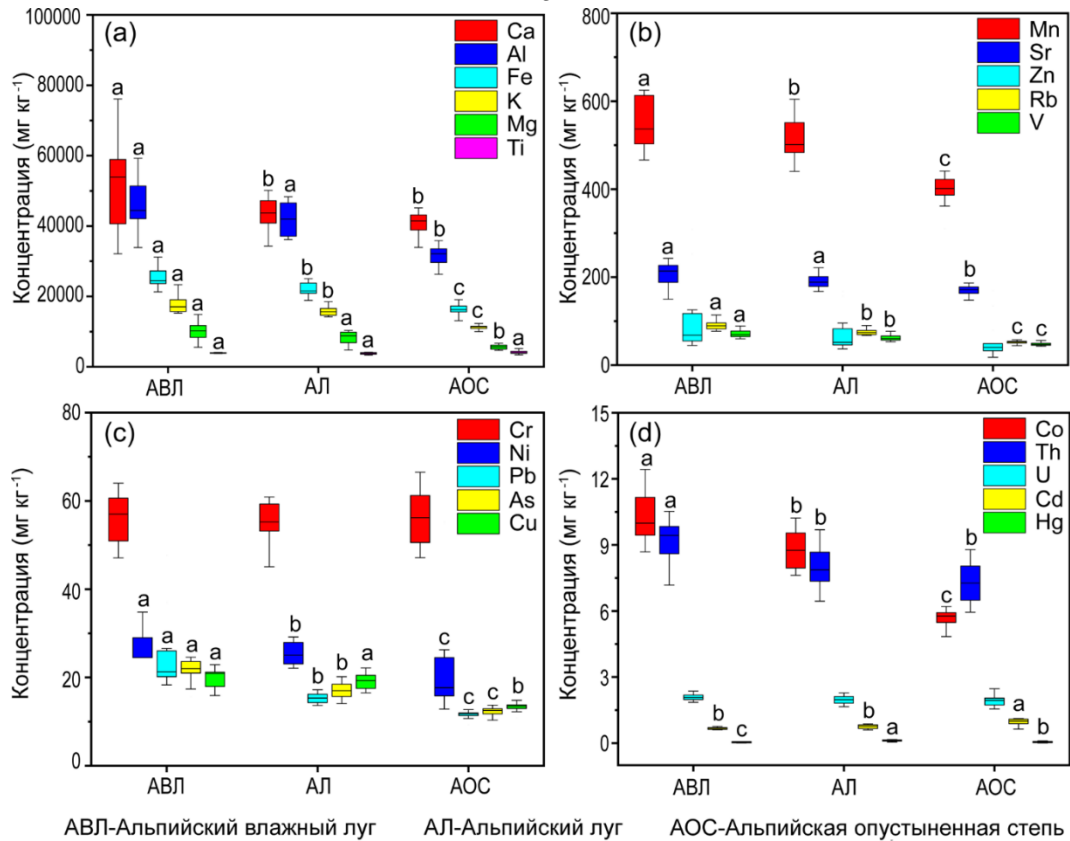


Рисунок 7 – Концентрации химических элементов под различными типами растительного покрова в криогенных почвах Цинхай-Тибетского плато
 Примечание: (a) Ca, Al, Fe, K, Mg, Ti; (b) Mn, Sr, Zn, Rb, V; (c) Cr, Ni, Pb, As, Cu; (d) Co, Th, U, Cd, Hg. Разные буквы обозначают значимые уровни между химическими элементами для разных типов растительного покрова ($p < 0,05$).



Рисунок 8 – Распределение источников тяжёлых металлов и металлоидов (ТММ) в криогенных почвах центральной части Цинхай-Тибетском плато

В настоящем исследовании было проведено сравнение содержания ТММ в криогенных почвах центральной части Ямальского региона и Цинхай-Тибетского плато. Почвы центральной части Ямальского региона относятся к практически незагрязненным, и на Цинхай-Тибетском плато почвенные концентрации Hg и Cd представляют потенциальные экологические риски. Это связано с тем, что почвы в центральной части Ямальского региона преимущественно характеризуются лёгким гранулометрическим составом, с низкой способностью к накоплению металлов. Регион Цинхай-Тибетского плато подвержен воздействию Индийского муссона и западных ветров, которые переносят ТММ из районов с антропогенной нагрузкой, что приводит к аккумуляции загрязняющих веществ.

3.3 Влияние процесса деградации криогенных почв на содержание органического углерода, общего азота, тяжёлых металлов и металлоидов в центральной части Цинхай-Тибетского плато

На основании полученных данных отмечается, что процесс деградации криогенных почв сопровождается изменением содержания органического углерода и общего азота в почвах (рис. 9). Содержание органического углерода и общего азота в верхнем слое почвы уменьшалось от фоновой почвы к почве с быстрым развитием солифлюкционного процесса криогенных почв, главным образом в связи с проявлением латерального перемещения вещества. Предыдущие исследования также отмечали, что эрозия верхних горизонтов почв может вызвать процесс снижения содержания органического углерода и общего азота почвы (Abbott et al., 2014; Liu et al., 2018).

Однако, в данном исследовании в ряду от быстрого к медленному солифлюкционному процессу была выявлена тенденция к увеличению содержания органического углерода и общего азота почвы, с высокими значениями стандартного отклонения. Это свидетельствует о возможности потери и/или накопления органического углерода и общего азота почвы в процессе развития солифлюкционных изменений. Сложные условия окружающей среды и различный рельеф приводят к непоследовательным изменениям содержания почвенного органического углерода и общего азота. Было установлено, влажность почвы, объёмная плотность и рН почв коррелировали с содержанием органического углерода и общего азота в почвах (рис. 10). Более высокая влажность почвы, меньшая объёмная плотность и менее низкий рН способствуют накоплению органического углерода и органического азота в почве.

Процесс деградации криогенных почв также сопровождается изменением содержания ТММ в почвах (рис. 9). Концентрации Fe и Mn увеличились в ряду от фоновой почвы до почвы с быстрым развитием солифлюкционного процесса криогенных почв. На третьей стадии солифлюкции концентрации Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, Cu, Pb, и Cd уменьшились с 3.11% до 45.07% от почвы с быстрым развитием солифлюкции к почве с медленным проявлением солифлюкционного процесса.

Результаты статистического анализа показывают, что влажность, pH и неорганический углерод почвы влияют на подвижность и перераспределение ТММ в процессе деградации криогенных почв. Колебания влажности почвы, включая чередование увлажнения и высыхания, вызывали эффекты Бирча, которые характеризуются перемещением ТММ при повторном увлажнении сухой почвы (Birch H.F., 1958; Ernakovich et al., 2017). pH почвы также играет важную роль в растворимости и скорости растворения оксидов и гидроксидов металлов (Kleber et al., 2015). При повышении pH формируются нерастворимые соединения оксидов и гидроксидов металлов, что приводит к снижению концентрации ТММ в почвах. При этом неорганические формы углерода представлены преимущественно в виде карбонатов, которые способны сорбировать и закреплять ТММ на своей поверхности через ионный обмен, изоморфные замещения, комплексообразование и образование труднорастворимых солей, что снижает подвижность ТММ (Fontes, dos Santos, 2009).

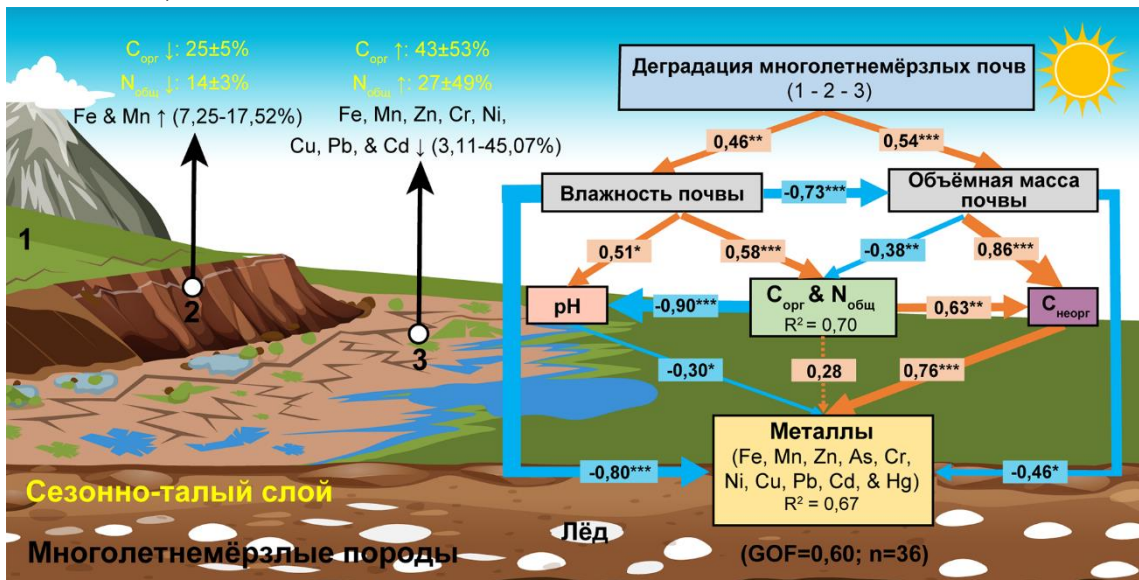


Рисунок 9 – Механизм влияния стадий деградации криогенных почв с использованием модели partial least squares path modeling (PLS-PM) в центральной части Цинхай-Тибетского плато

Примечание: 1 – фоновая почва, незатронутая солифлюкцией; 2 – начальная стадия солифлюкции, т.е. быстрый процесс солифлюкции; 3 – финальная стадия солифлюкции, т.е. медленный процесс солифлюкции;

$C_{орг}$ – органический углерод почвы; $N_{общ}$ – общий азот почвы;

$C_{неорг}$ – неорганический углерод почвы; pH – измерен в водной вытяжке (соотношение почва : вода = 1:2,5); ТММ – тяжёлые металлы и металлоиды.

Цифры, примыкающие к стрелкам, обозначают стандартизированные коэффициенты пути. Оранжевые стрелки обозначают положительные взаимосвязи, синие стрелки – отрицательные, пунктирные стрелки – несущественные. Толщина линии указывает на степень силы соответствующего коэффициента пути. Модель PLS-PM оценивалась по параметру степени соответствия (goodness of fit, GOF).

***: $p < 0,001$, **: $p < 0,01$, *: $p < 0,05$.

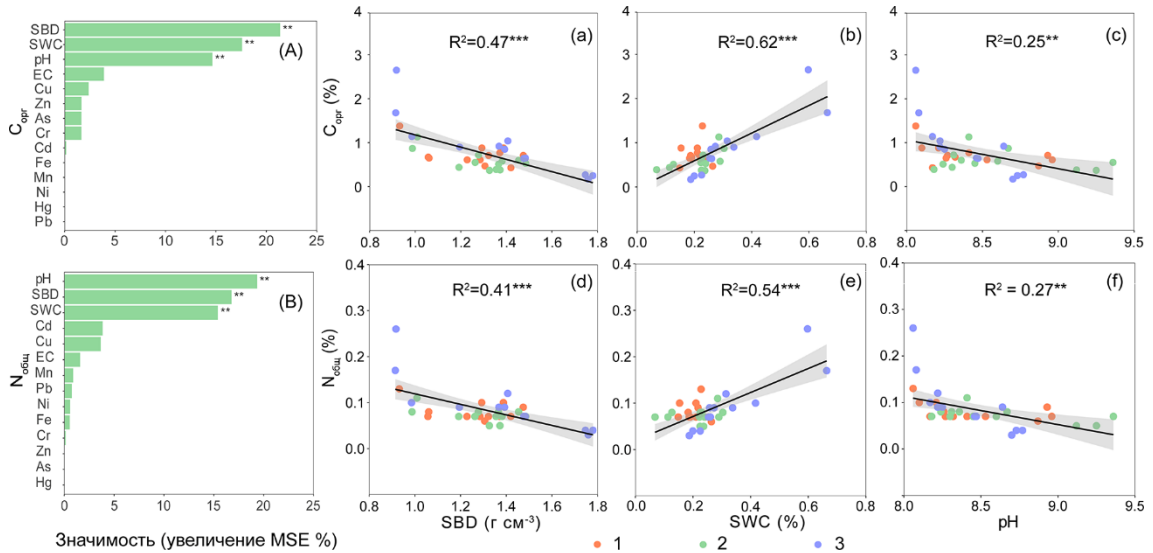


Рисунок 10 – Факторы, влияющие на органический углерод почвы ($C_{орг}$) и общий азот почвы ($N_{общ}$) в районах деградации криогенных почв в центральной части Цинхай-Тибетского плато

Примечание: (A) и (B): относительная значимость свойств, влияющих на $C_{орг}$ и $N_{общ}$, выявленная с использованием модели Random forest (RF). MSE, средняя квадратичная ошибка. (a) – (f): регрессионный анализ $C_{орг}$ и $N_{общ}$ на трёх стадиях развития солифлюкции. 1 – фоновая почва, незатронутая солифлюкцией; 2 – начальная стадия солифлюкции, т.е. быстрый процесс солифлюкции; 3 – финальная стадия солифлюкции, т.е. медленный процесс солифлюкции). ***: $p < 0,001$, **: $p < 0,01$, *: $p < 0,05$. Серые области регрессионного анализа представляют собой 95% доверительный интервал.

Процесс деградации криогенных почв изменяет микро- и мезорельеф, влажность почвы, окислительно-восстановительные условия, степень минерализации соединений углерода и выраженность процесса криогенного массообмена. Полученные результаты указали на то, что стадии процесса деградации криогенных почв оказали косвенное воздействие на органический углерод и общий азот почвы ($R^2 = 0,70$), и также на ТММ ($R^2 = 0,67$) (рис. 9). При этом взаимодействие между органическим углеродом и ТММ играет важную роль в сохранении органического углерода почвы в процессе деградации криогенных почв (Possinger et al., 2020; Kleber et al., 2021; Thomas et al., 2023). Значительное снижение концентраций ТММ на третьей стадии деградации, характеризующейся медленным развитием солифлюкции криогенных почв, может ослабить их способность к аккумуляции, сосаждению и хелатированию с органическим веществом, тем самым снижая степень стабилизации органо-минеральных соединений.

ВЫВОДЫ

(1) Почвы центральной части Ямальского региона представлены преимущественно альфегумусовыми и торфяными отделами. В почвенных профилях центральной части Ямальского региона распределение содержания ТММ

связано с содержанием органического углерода и общего азота, типом почвы (агродерново-подбуры иллювиально-железистые) и воздействием антропогенной деятельности (технотурбации). Основными источниками ТММ в криогенных почвах центральной части Ямальского региона являются почвообразующие породы, дальний атмосферный перенос, предшествующая сельскохозяйственная деятельность и транспорт. Криогенные почвы центральной части Ямальского региона находятся в практически незагрязнённом состоянии.

(2) На территории Цинхай-Тибетского плато доминируют слабо развитые и криогенные почвы. Распределение ТММ в почвенных профилях центральной части Цинхай-Тибетского плато обусловлено типом растительного покрова. В частности, за исключением Cd и Hg, наибольшие концентрации ТММ наблюдаются в почвах альпийского влажного луга, затем следуют почвы альпийских лугов, а самые низкие значения отмечаются в почвах альпийской опустыненной степи. Основными источниками ТММ в криогенных почвах центральной части Цинхай-Тибетского плато являются почвообразующие породы, атмосферный перенос и транспорт. Концентрации Hg и Cd представляют потенциальные экологические риски в криогенных почвах Цинхай-Тибетского плато.

(3) Тенденции накопления ТММ сильно различаются для обоих объектов исследования. Концентрации ТММ в почвах центральной части Ямальского региона значительно ниже, чем в почвах Цинхай-Тибетского плато, что обусловлено спецификой процессов почвообразования и особенностями источников поступления ТММ. В частности, почвы в центральной части Ямальского региона преимущественно характеризуются легким гранулометрическим составом, с низкой способностью к накоплению металлов. В то же время, регион Цинхай-Тибетского плато подвержен воздействию Индийского муссона и западных ветров, которые переносят ТММ из районов с антропогенной нагрузкой, что приводит к аккумуляции загрязняющих веществ.

(4) Процесс деградации криогенных почв изменяет микро- и мезорельеф, влажность почвы, окислительно-восстановительные условия, степень минерализации соединений углерода и выраженность процесса криогенного массообмена, что ещё больше влияет на перераспределение органического углерода, общего азота и ТММ в почвенном профиле. Интенсивный солифлюкционный процесс при деградации ландшафтов криолитозоны приводит к увеличению потери органического углерода и общего азота почв. Концентрации Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, Cu, Pb и Cd снижаются в ходе медленного развития солифлюкции криогенных почв. Fe и Mn могут быть использованы в качестве геохимических индикаторов деградации многолетнемерзлых почв. При этом значительное снижение концентраций ТММ на третьей стадии деградации, характеризующейся медленным развитием солифлюкции криогенных почв, может ослабить их способность к аккумуляции, совместному осаждению и

хелатированию с органическим веществом, тем самым снижая степень стабилизации органо-минеральных соединений.

Таким образом, наше исследование выявило основные закономерности накопления ТММ в криогенных почвах высокоширотного Ямальского региона и высокогорного Цинхай-Тибетского плато, определило потенциальные источники ТММ в двух криогенных районах, проанализировало местные потенциальные экологические риски, связанные с ТММ, и исследовало воздействие процесса деградации криогенных почв на содержание почвенного органического углерода, общего азота и ТММ. Результаты исследования могут служить научной основой для дальнейших исследований экологической безопасности и геохимического поведения в условиях изменения климата в криолитозоне.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science

1. **Wang, W.** Effects of permafrost collapse on soil carbon, nitrogen, and metal elements on the Qinghai-Tibet Plateau / W. Wang, E. Abakumov, X. Wu, J. Chen, G. Li, D. Wang, H. Xu, G. Liu, S. Yang, V. Polyakov, T. Nizamutdinov, X. Ji // *Catena*. – 2024. – V. 246. – Art. No 108425. – DOI.org/10.1016/j.catena.2024.108425. Q1

2. **Wang, W.** Accumulation pattern and risk assessment of metal elements in permafrost-affected soils on the Qinghai-Tibet Plateau / W. Wang, E. Abakumov, X. Wu, X. Ji, C. Mu, X. Zhu, G. Li // *Catena*. – 2023. – V. 220. – Art. No 106665. – DOI.org/10.1016/j.catena.2022.106665. Q1

3. Li, G. A new approach to increased land reclamation rate in a coal mining subsidence area: a case – study of Guqiao Coal Mine, China / G. Li, Z. Hu, D. Yuan, P. Li, Z. Feng, Y. He, **W. Wang** // *Land Degradation & Development*. – 2022. – V. 33, – No. 6. – P. 866–880. – DOI.org/10.1002/ldr.4184. Q1

4. **Wang, W.** Ecological status assessment of permafrost-affected soils in the Nadym Region, Yamalo-Nenets Autonomous District, Russian Arctic / W. Wang, T. Nizamutdinov, A. Pechkin, E. Morgun, G. Li, X. Wu, S. Yang, E. Abakumov // *Land*. – 2024. – V. 13. – No. 9. – Art. No 1406. – DOI.org/10.3390/land13091406. Q1

5. **Wang, W.** Assessing sources and distribution of heavy metals in environmental media of the Tibetan Plateau: a critical review / W. Wang, X. Ji, E. Abakumov, V. Polyakov, G. Li, D. Wang // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – V. 10. – Art. No 874635. – DOI.org/10.3389/fenvs.2022.874635. Q1

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

6. **Ван, В.** Вертикальное профильное распределение углерода, азота и металлов в криогенных почвах и породах центральной части Цинхай Тибетского плато / В. Ван, Е. В. Абакумов, С. Ву, Г. Ли // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 52. – DOI.org/10.18522/2308-9709-2025-52-1. K3

Публикации в сборниках трудов конференций

7. **Ван, В.** Распределение содержания микроэлементов в криогенных почвах Надымского района ЯНАО / В. Ван, Е.В. Абакумов, Т.И. Низамутдинов, А.С. Печкин // Проблемы криосферы Земли: сборник тезисов Всероссийской научной конференции, Пушино, 12–16 мая 2025 года. – Пушино: ИФХиБПП РАН, 2025. – С. 269.

8. **Ван, В.** Влияние процесса деградации многолетнемерзлых почв на содержание почвенного органического углерода, общего азота и микроэлементов в центральной части Цинхай-Тибетского плато / В. Ван, Е.В. Абакумов, С. Ву, С. Ян // Региональное сотрудничество БРИКС: современные проблемы экологии и природопользования: материалы второй международной научно-практической конференции: тезисы докладов, Петрозаводск, Республика Карелия, 18–20 сентября 2024 года. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2024. – С. 114.

9. **Ван, В.** Оценка экотоксикологического состояния мерзлотных почв Надымского района ЯНАО и Цинхай-Тибетского плато / В. Ван, Е.В. Абакумов, Т.И. Низамутдинов, А.С. Печкин // Мерзлотные почвы в антропоцене: сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции, Салехард-Лабытнанги, ЯНАО, 20–26 августа 2023 года. – Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2023. – С. 245–246.

10. **Ван, В.** Методы и подходы восстановления окружающей среды на углепромышленной территории имени Мули в зоне многолетнемерзлых почв Цинхай-Тибетского плато / В. Ван, Е.В. Абакумов, Г. Ли, П. Ли // Биомониторинг в Арктике: Сборник материалов III международной конференции, Архангельск, 11–12 октября 2022 года. – Архангельск: САФУ, 2022. – С. 22–24.