

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. — Латеральная и радиальная дифференциация геохимического состава криогенных почв учебно-научного полигона Хановей, Большеземельская тундра // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40136 EDN: RDPROK URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40136

Латеральная и радиальная дифференциация геохимического состава криогенных почв учебно-научного полигона Хановей, Большеземельская тундра

Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009



✉ vasilch_geo@mail.ru

Гинзбург Александр Павлович

инженер, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru



[Статья из рубрики "Почвы холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.40136

EDN:

RDPROK

Дата направления статьи в редакцию:

05-04-2023

Аннотация: Предметом исследования являются почвенно-геохимические особенности криогенных южнотундровых ландшафтов учебно-научного полигона Хановей, расположенного вблизи одноимённого посёлка Воркутинского района Республики Коми. Составлены морфологические описания почвенных профилей в соответствии с современной российской классификационной системой. Выполнялись химико-аналитические лабораторные работы с целью установления значений физико-химических параметров почвенных горизонтов – pH, содержания легкорастворимых

солей, содержания органического углерода, гранулометрического состава, фракционного состава железа. Главным аспектом почвенно-геохимических свойств ландшафтов УНП Хановей являлся валовой химический состав криогенных почв. Валовые содержания химических элементов были определены методом рентгеновской флуоресценции при помощи портативного РФА. После этого рассчитаны геохимические коэффициенты радиальной (профильной) и латеральной (катенарной) дифференциации концентраций химических элементов – R и L. Наибольшими значениями коэффициентов R в профилях почв характеризуются глеевые горизонты почв, в том числе, надмерзлотные. Торфяные горизонты без примесей минеральной фракции почвы обеднены большей частью элементов ($R = 0,1 - 0,3$), а минеральные горизонты почв отличаются повышенными значениями RFe, RMn др. Нижняя часть катены с почвами преимущественно песчаного гранулометрического состава обеднена большей частью элементов (Ti, Zn, Zr и др.), а суглинистые почвы в верхней части накапливают эти элементы и формируют повышенные значения L-коэффициента.

Ключевые слова:

криогенные почвы, почвенно-геохимическая катена, макро- и микроэлементов, латеральная дифференциация, радиальная дифференциация, Большеземельская тундра, тундровые почвы, Воркутинский район, учебно-научный полигон Хановей, Коми республика

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (номер проекта РНФ 23-17-00082)

1. Введение

На севере Европейской территории России в криолитозоне многолетнемёрзлые породы (ММП) в основном распространены прерывисто^[7], в результате чего создаётся большое количество различных геокриологических обстановок в различных ландшафтных условиях^[22,25], причём при продвижении по Большеземельской тундре с юга на север ландшафтное разнообразие возрастает^[14]. Учебно-научный полигон Хановей, расположенный в ландшафтной подзоне южной тундры, характеризуется высоким разнообразием мерзлотно-ландшафтных обстановок, распространённым на небольшой территории, в результате чего исследования закономерностей распространения ММП и сопутствующих им природных процессов, в том числе, почвенно-геохимических^[3,5,19], здесь становятся возможными без существенных трудозатрат. Таяние ММП в результате климатических изменений особенно ярко проявляется в районе южной границы криолитозоны^[4]. Увеличение мощности сезонно-талого слоя (СТС) почв из года в год способствует росту глубины протекания активной миграции химических веществ и снижению контрастности профильных распределений содержания химических элементов.

2. Объекты и методы

2.1. Физико-географические условия района исследования

Географическое положение

Район исследования расположен на пологонаклонной надпойменной террасе реки Воркуты (юго-восток Большеземельской тундры) в среднем её течении ($67^{\circ}17'9.05''$ с.ш.,

63°39'25.38" в.д., высота над уровнем моря = 150 м). УНП Хановей представляет собой участок пологого склона площадью около 0,5 км², ограниченный с запада линией железной дороги Москва – Воркута, с востока – урезом реки Воркуты. Ближайшим населённым пунктом к полигону является посёлок Хановей с одноимённой железнодорожной станцией, прилегающей к полигону с юго-запада. От г. Воркуты район исследования удалён на 30 км к юго-западу (рис. 1).



- Административный центр
- Посёлки с постоянным населением
- Станции и вахтовые посёлки

- Заброшенные посёлки
- — — Железнодорожная линия
- · · · · Закрытая железнодорожная линия
- Ключевой участок исследования

Рис. 1. Расположение УНП Хановей

Физико-географическая характеристика района исследования

Наибольшую площадь на территории Коми занимает обширная Печорская низменность долин рек Печоры и Усы [13]. Наиболее древними отложениями являются раннедокембрийские (возраст более 2 млрд. лет), а поверхность сложена ледниками и послеледниковыми валунными суглинками и песками с аллювиальными и озёрно-болотными песками, супесями и суглинками [1,8]. Макроформы рельефа были образованы в результате проявлений неровностей кровли коренных отложений, а мезорельеф сформирован при активном действии экзогенных процессов – эрозии и аккумуляции. К таковым относятся возвышенности грядового типа (мусюры), широкие, хорошо выработанные речные долины, а также сочетания выпуклых торфяных бугров пучения (пальза) с заозёренными термокарстовыми понижениями [9]. Многолетнемёрзлые породы (ММП) имеют здесь несплошное (50–95% площади) и массивно-островное (10–50%) распространение (рис. 2). Температуры ММП несплошного распространения характеризуются диапазоном средних температур от 0,5 до $-2,0^{\circ}\text{C}$, массивно-островного – от $+1$ до -1°C . Мощность сезонно-талого слоя (СТС) здесь достигает 1–1,7 м в зависимости от гранулометрического состава субстрата [25]. Характер растительного покрова оказывает значительное влияние на глубину промерзания и оттаивания.

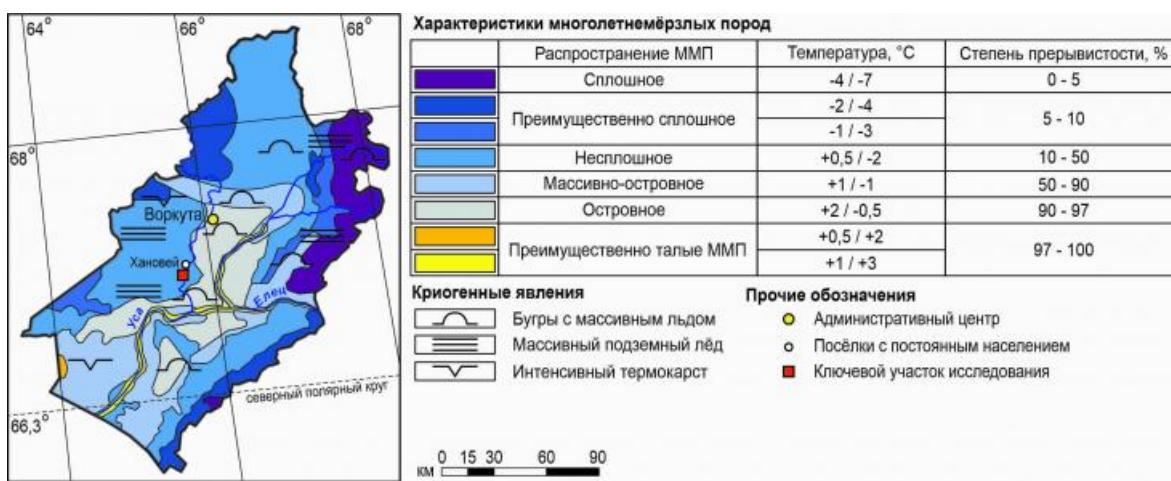


Рис. 2. Геокриологическая карта Воркутинского района Республики Коми, по [25]

Климат Воркутинского района относится к субарктическому типу. Среднегодовая температура воздуха составляет $-5,4^{\circ}\text{C}$, в июле он прогревается до $+13,2^{\circ}\text{C}$, а наиболее холодный месяц – январь с температурой $-19,5^{\circ}\text{C}$ (по данным метеорологической станции Воркута [12]). Длительность вегетационного периода здесь составляет 92 дня, а сумма активных температур достигает 493°C . Влажность воздуха практически в течение всего года одинакова и составляет 81%. В среднем в год выпадает 507 мм атмосферных

осадков. Мощность снежного покрова здесь варьирует от 53 до 180 см. Междуречные пространства занимают почвы типа глеезёмов, а на пологих склонах развиты криометаморфические почвы [3, 19]. Различная мощность торфяного горизонта на полигоне обеспечивает классификационные различия криозёмов (профиль О – CR – C(g)) и торфяно-криозёмов (профиль Т – CR – C(g)), глеезёмов (профиль О – G – CG) и торфяно-глеезёмов (Т – G – CG) [11]. На почвах более лёгкого гранулометрического состава встречаются кустарничково-зеленомошные лишайниковые тундры, на суглинистых почвах развиты травяно-кустарничково-сфагновые ерниковые тундры в комплексах с пущево-осоково-сфагновыми болотами. [6, 18]

Более подробно физико-географические условия были описаны в нашей работе. [5]

2.2. Полевые методы исследований

Полевые работы были проведены на УНП Хановей и прилегающих к нему территориях в сентябре 2022 г. В процессе исследований были заложены 10 разрезов почв в различных ландшафтных условиях от низкой поймы реки Воркуты до слабовыпуклой поверхности междуречной равнины (рис. 2).

9 из 10 заложенных разрезов составили почвенно-геохимическую катену правобережья Воркуты. Разрезы почв закладывались при помощи лопат. В случае достижения верхней границы ММП образцы мёрзлых пород выбивались из толщи при помощи топора. Образцы сезонно-талых горизонтов почв отбирались при помощи ножей в пластиковые пакеты zip-lock. Общая масса каждого образца составляла 250–500 г. В полевых условиях горизонты почв описывались по схеме, предложенной для комплексного описания в Классификации и диагностике почв России [11] и Полевом определителе почв. [17] Полевые названия почв также были даны исходя из сочетаний диагностических генетических горизонтов и признаков, указанных в Полевом определителе почв. [17]

2.3. Лабораторные методы исследований

В упакованном состоянии пробы были доставлены в химико-аналитическую лабораторию эколого-геохимического центра (ЭГЦ) географического факультета МГУ (г. Москва). Они были высушены при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, после чего подвергались соответствующим процедурам пробоподготовки для дальнейшего лабораторного изучения химического состава и физико-химических свойств. В лабораторных условиях были проанализированы следующие аналитические показатели почв: кислотность водной вытяжки (рН), общее содержание легкорастворимых солей (TDS), общее содержание органического углерода ($C_{орг.}$), гранулометрический состав почв (с указанием класса в соответствии с систематикой Н.А. Качинского), концентрации несиликатного (Fe_{HC}) и оксалаторастворимого (Fe_a) железа в почвах, а также валовое содержание макро- и микроэлементов.

Кислотность водных вытяжек

Для анализа кислотности почв проба была перетёрта фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, а затем просеяна сквозь сито с диаметром пор 1 мм. Кислотность была измерена ион-селективным электродом METTLER TOLEDO в суспензии, изготовленной в соотношении почвы к дистиллированной воде 1:2,5, а в случае анализа органогенных горизонтов соотношение уменьшалось до 1:25.

Общее содержание легкорастворимых солей

Пробоподготовка для выполнения анализа содержания легкорастворимых солей была аналогична описанной выше для исследования почвенной кислотности. Содержание водорастворимых солей в почвах было исследовано лабораторным кондуктометром METTLER TOLEDO в суспензии, изготовленной в соотношении почвы к дистиллированной воде 1:2,5.

Общее содержание органического углерода

Концентрации органического углерода в почвах были исследованы методом И.В. Тюрина с фотометрическим окончанием. Для этого образец почв перетирался фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, затем просеивался сквозь сито с диаметром пор 0,25 мм. Взвешенная на аналитических лабораторных весах навеска почвы массой 1 г заливалась 10 мл 0,4М бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) и помещалась в сушильный шкаф, разогретый до $+150^{\circ}C$, на 40 минут. Затем вытяжка остужалась при комнатной температуре и оттитровывалась 0,2М раствором соли Мора (двойная сернокислая соль железа и аммония - $FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$) в присутствии 5-6 капель фенилантраниловой кислоты ($C_{13}H_{11}NO_2$). Конечной точкой при данном виде окислительно-восстановительного титрования является смена окраски раствора с рыжевато-коричневой на тёмно-зелёную. Вычисление содержания органического углерода проводилось по формуле:

$$C_{\text{опт.}} \% = \frac{(V_1 - V_2) \times M \times 0,003 \times 100}{m}$$

где V_1 – объём раствора соли Мора, пошедший на титрование холостой пробы (пробы без навески) почвы (cm^3); V_2 – объём раствора соли Мора, пошедший на титрование пробы с навеской почвы (cm^3); M – молярность раствора соли Мора; 0,003 – молярная масса $\frac{1}{4}$ С (г/моль); 100 – коэффициент перевода на 100 г почвы; m – масса сухой навески почвы.

Гранулометрический состав

Образец почвы для гранулометрического анализа перетирался резиновым пестиком в фарфоровой ступке и просеян сквозь сито с диаметром пор 1 мм. Гранулометрический состав почв был исследован методом лазерной гранулометрии после перетирания навески в фарфоровой чашке резиновым пестиком с раствором пирофосфата натрия ($Na_4P_2O_7$). Пирофосфат применяется для устранения слипания частиц почвы. Анализ гранулометрического состава почв был измерен на лазерном гранулометре Fritsch Analysette-22 (Германия). Для классификации почв по содержанию фракции физической глины в них использовалась шкала Н.А. Качинского (табл. 1).

Таблица 1. Классификация почв подзолистого типа почвообразования по содержанию фракции физической глины (Н.А. Качинского)

Класс гранулометрического состава	Содержание физической глины, %
Песчаные	
Рыхло-песчаный	0 – 5
Связно-песчаный	5 – 10
Супесчаный	10 – 20
Суглинистые	
Легкосуглинистый	20 – 30
Среднесуглинистый	30 – 40

Среднесуглинистый		50 – 40
Тяжелосуглинистый		40 – 50
Глинистые		
Легкоглинистый		50 – 65
Среднеглинистый		65 – 80
Тяжелоглинистый		>80

Концентрации несиликатного и оксалаторастворимого железа

Определение дитионит-растворимых соединений железа выполнялось по методу Мера-Джексона. Навеску воздушно-сухой почвы, просеянной через ситео с диаметром отверстий 1 мм, массой 2 г помещали в центрифужную пробирку вместимостью 50 см³. В пробирку приливали 20 мл 0,3М раствора цитратанатрия (Na₃C₆H₅O₇) и 2,5 мл 1М раствора гидрокарбоната натрия (NaHCO₃), перемешивали круговыми движениями и нагревали на водяной бане до 800°C. Затем в пробирку вносили 0,5 г сухого порошка дитионита натрия (Na₂S₂O₄) и перемешивали стеклянной палочкой. После этого в пробирку добавляли 5 мл насыщенного раствора хлорида натрия (NaCl), перемешивали и оставляли на водяной бане до образования хлопьевидного осадка. Затем проводили центрифугирование в течение 10 мин при 3000 об/мин, центрифугат сливал через сухой плотный фильтр в мерную колбу вместимостью 250 мл. Обработку почвы в центрифужной пробирке повторяли еще два раза, собирая центрифугаты в ту же мерную колбу. После охлаждения содержимое мерной колбы доводили дистиллированной водой до метки и перемешивали. Концентрация железа в полученному растворе определялась методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Для анализа группового состава железа пробы почвы была перетёрта фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, а затем просеяна сквозь ситео с диаметром пор 1 мм. Экстракция окристаллизованных соединений железа из почв была выполнена методом Ф. Тамма, основанным на экстракции окристаллизованного железа с помощью буферного раствора Тамма (0,14М по H₂C₂O₄ и 0,2М по (NH₄)₂C₂O₄). Залитая буферным раствором навеска почвы массой 1 г профильтровывалась сквозь складчатый бумажный фильтр «синяя лента» с диаметром пор 0,45 мкм. Процедура фильтрования повторялась 3 раза, после чего раствор был разбавлен дистиллированной водой в мерной колбе объёмом 250 мл и разлит по пластиковым пробиркам. Анализ концентраций оксалаторастворимых форм железа был проведён методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Валовые содержания макро- и микроэлементов

Концентрации макро- и микроэлементов были измерены в перетёртых в агатовой ступке и просеянных сквозь ситео с диаметром пор 0,25 мм образцах почв методом рентген-флуоресцентного анализа (РФА). Для этого был использован портативный горно-геологический рентген-флуоресцентный анализатор Olympus Delta Professional (США). Этот прибор способен определять валовые концентрации 35 химических элементов с атомными массами от Mg до U.

2.4. Геохимические ландшафты и коэффициенты

Описания и характеристики геохимических особенностей ландшафта даны в соответствии с работами А.И. Перельмана и Н.С. Касимова^[16]. Для характеристики элементарных геохимических ландшафтов им были даны названия в соответствии с классификацией М.Д. Богдановой с соавторами^[2]. В качестве основного критерия выделения элементарных ландшафтов здесь используются формы (и элементы) рельефа.

Для характеристики пространственной неоднородности химического состава почв были использованы геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации.^[15,16] Коэффициент радиальной дифференциации (R_x) используется для изучения профильной (вертикальной) неоднородности химического состава путём сравнения концентраций конкретных веществ в почвенных горизонтах с таковыми в горизонте почвообразующей породы:

$$R_x = R_{x(\text{гор.})}/R_{x(\text{пор.})}$$

где $R_{x(\text{гор.})}$ – концентрация химического вещества x в почвенном горизонте; $R_{x(\text{пор.})}$ – концентрация химического вещества x в почвообразующей породе.

Коэффициент латеральной дифференциации (L_x) используется для изучения катенарной (субгоризонтальной) неоднородности химического состава ландшафта. В данном случае сравнение ведётся между концентрацией химического вещества x в почвах подчинённых и автономных (элювиальных) элементарных геохимических ландшафтов. Этот показатель призван охарактеризовать латеральную миграцию химических веществ в почвах, связанных едиными потоками влаги, перемещающейся по рельефу сверху вниз под действием силы тяжести. В качестве модельной области при использовании L выступает почвенно-геохимическая катена:

$$L_x = L_{x(\text{подч.})}/L_{x(\text{авт.})}$$

где $L_{x(\text{подч.})}$ – концентрация химического вещества x в подчинённом элементарном геохимическом ландшафте; $L_{x(\text{авт.})}$ – концентрация химического вещества x в автономном (элювиальном) элементарном геохимическом ландшафте.

При анализе катенарной неоднородности химического состава почв в долине Вилюя параллельно приводятся данные о коэффициентах L сезонно-талых и многолетнемёрзлых горизонтов почв.

3. Результаты

3.1. Почвенно-геохимическая структура учебно-научного полигона Хановей

Встреченные на Хановейском УНП криогенные почвы представлены профилями типов криометаморфические, криозёмы, торфяно-глеевозёмы, торфяные, а также серогумусовые и аллювиальные. Среди подтипов широко распространены глеевые и глееватые, поскольку в надмерзлотных горизонтах суглинистого гранулометрического состава часто развиваются восстановительные условия среды, что приводит к морфологическим проявлениям восстановления железа. Криогенно-ожелезнённые подтипы почв, также часто встречающиеся здесь свидетельствуют о проявлении смыкания нижней границы ММП с фронтом промерзания сверху, в месте которого концентрируется окисленная форма железа.^[11] Подробно условия почвообразования и морфологическое строение почвенных профилей рассмотрены в нашей работе.^[5]

Заложенная на левом берегу р. Воркуты почвенно-геохимическая катена представляет собой последовательно расположенные от приводораздельной поверхности до низкой поймы Вилюя элементарные геохимические ландшафты (рис. 3): элювиальный первого порядка с преобладанием радиальной миграции вещества (\mathcal{E}_{1R}) ландшафт приводораздельной поверхности, элювиальные ландшафты второго порядка (\mathcal{E}_2)

надпойменных террас – третьей и второй, трансэлювиальные ландшафты со слабым (ТЭ₁) и интенсивным (ТЭ₃) выносом на склонах надпойменных террас, поверхность первой надпойменной террасы, покрытой слоем элювиального материала и слабо выраженной в рельефе, всё же обособлена и представляет собой трансэлювиально-аккумулятивный ландшафт (ТЭА), а ниже по рельефу располагается поверхность низкой поймы – супераквальный транзитный (СТ₃) ландшафт. Аквальный ландшафт (А) р. Воркуты является замыкающим в катенарной цепи, однако рассмотрение его геохимической специфики не входит в задачи данного исследования.

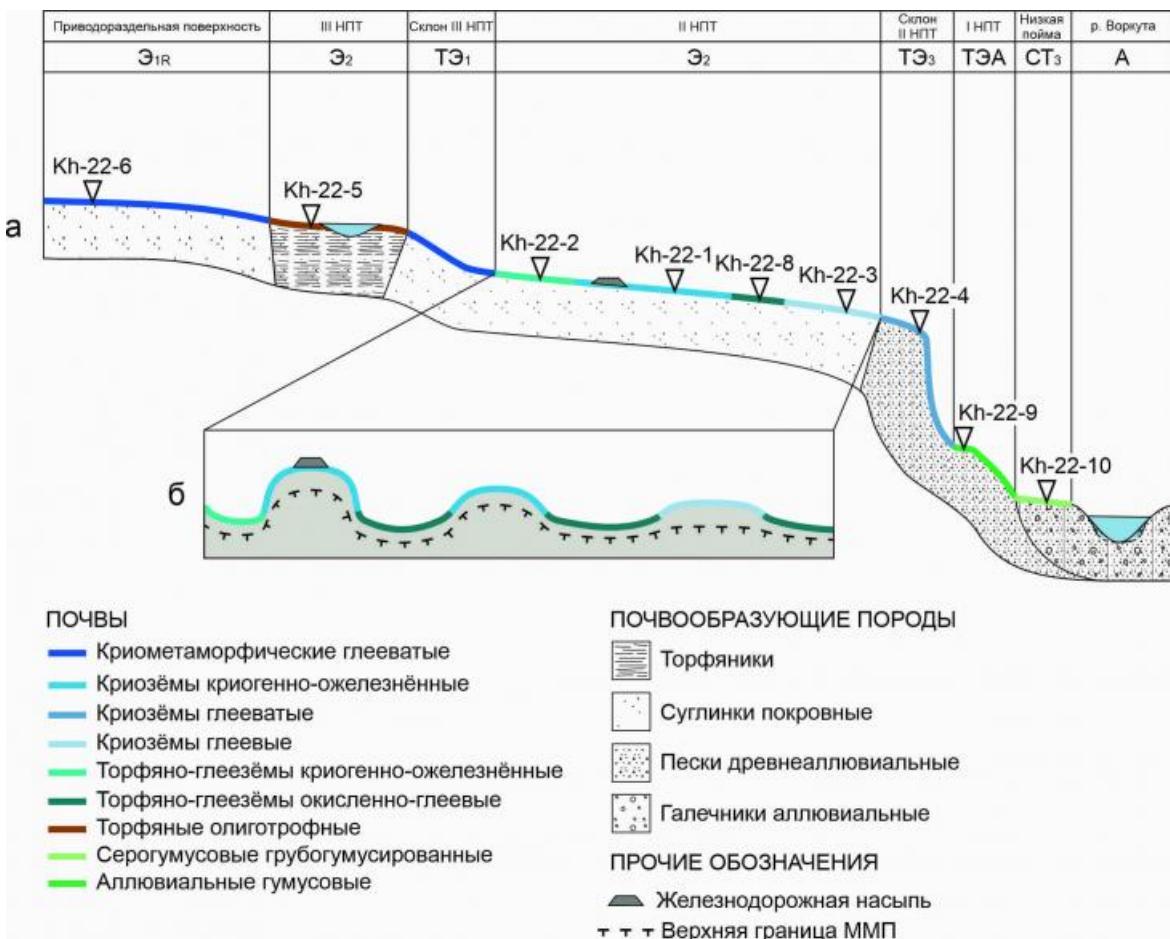


Рис. 3. Почвенно-геохимическая катена на учебно-научном полигоне Хановей (а) и микроструктура почвенного покрова первой надпойменной террасе (б)

Верхние части почвенно-геохимической катены на элементах рельефа с улучшенным дренажом, глубиной залегания ММП более 1 м, а также суглинистым гранулометрическим составом почвообразующих пород (рис. 3а) характеризуются ареалами криометаморфических почв (приводораздельная поверхность, склон третьей надпойменной террасы). На третьей и второй надпойменных террасах развиты глубоко протаивающие (более 2 м) торфяные отложения, на третьей их мощность превышает 2 м (рис. 3а), что позволяет выделить на ней ареал торфяных олиготрофных почв. На второй надпойменной террасе мощность торфа не превышает 0,5 м, а ниже залегают суглинистые почвообразующие породы (верхняя граница ММП расположена на глубине около 0,6–0,7 м), что соответствует типичному строению профилей торфяно-глеевым (рис. 3а). Этот тип почвы встречается в понижениях между торфяными буграми пучения – пальза, а на вершинах бугров развиты криозёмы криогенно-ожелезнённые и глеевые (последние – в почвах пятен медальонов). Криогенное пучение здесь является основным процессом, осложняющим рельеф и, как следствие, почвенный покров (рис.

36). В нижней части катены почвообразующими породами являются песчаные отложения склонов и первой фрагментарно представленной надпойменной террасы, а ниже расположена низкая пойма на галечниковом материале. На песчаных отложениях развиваются криозёмы глееватые и серогумусовые почвы, на галечниках низкой поймы распространены аллювиальные гумусовые почвы (рис. 3а). Глубина сезонного оттаивания на древнеаллювиальных песках и галечниках превышает 2 м, к тому же, вблизи уреза реки развита таликовая зона, ввиду чего многолетнемёрзлые горизонты в профилях почв не были встречены.

3.2. Физико-химические свойства криогенных почв УНП Хановей

Кислотность водных вытяжек почв варьирует в диапазоне pH от 4,7 до 7,5, что соответствует градациям от кислых до нейтральных. Более кислыми реакциями отличаются поверхностные органогенные горизонты почв (от 4,7 до 6,2), а к нижней части профилей значения повышаются и достигают 7,5. Среднее значение pH составляет 6,1. Варьирование в пределах профилей почв происходит с коэффициентом вариации 12,4% (табл. 3).

Легкорастворимые соли содержатся в почвах в пределах от 1,8 до 266 мг/л. Содержание солей в среднем равно 35,4 мг/л, квартили варьирования большей части концентраций составляют 8,7 (25%) и 49,1 (75%) мг/л, а значительные увеличения концентраций (рис. 4а) связаны с накоплением солей в верхних частях профилей, где концентрации выше среднепрофильных в 2–5 раз (табл. 2). Соответственно, средние значения электропроводности почв составляют 70,7 мкС/см, варьирование происходит в широких пределах от 3,6 до 532 мкС/см.

Содержания органического углерода в большей части изученных почв весьма высоки за счёт того, что органогенные горизонты зачастую представлены торфяниками или тундровыми подстилками слабой степени разложения. Максимальные содержания С_{орг} достигают 45,8%, а среднее содержание С_{орг} во всех изученных почвах составляет 14,3%. В верхних частях профилей, где сосредоточено больше всего органического вещества, а к нижней части профиля содержание С_{орг} резко снижается (иногда более, чем в 10 раз). Варьирование происходит в пределах от 0,5 до 45,8% (табл. 3, рис. 4а).

Содержание физической глины в изученных почвах в среднем равно 33,5%, наименьшее содержание составляет 6,6% (связно-песчаный гранулометрический состав горизонта - табл. 1), наибольшее содержание равно 59,9% (легкоглинистый гранулометрический состав - табл. 1). Коэффициент вариации содержания физической глины имеет значение около 40% (табл. 3), что свидетельствует о весьма контрастном распределении содержания гранулометрических фракций с диаметрами меньше 10 мкм в профилях почв. В верхней части катены наблюдаются почвы супесчаного и суглинистого гранулометрического состава (рис. 3), а нижней части профиля рельефа почвообразующие породы имеют облегчённый состав.

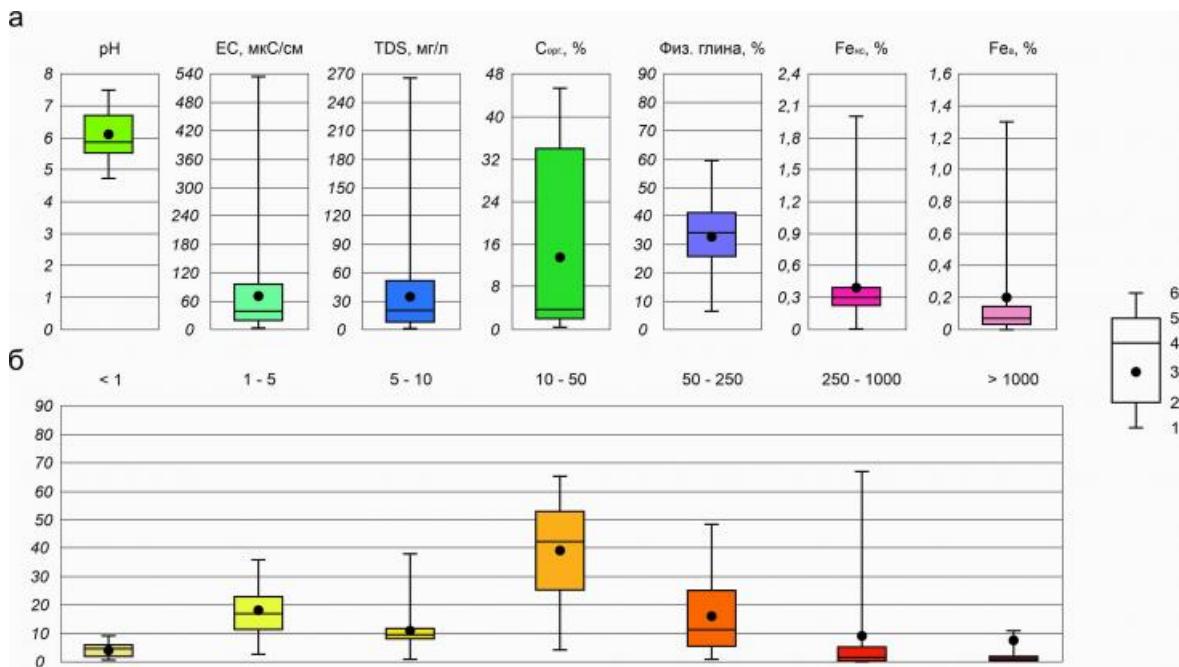


Рис. 4. Физико-химические свойства криогенных почв УНП Хановей: 1 – минимальное значение; 2 – квартиль 25%; 3 – среднее значение; 4 – медианное значение; 5 – квартиль 75%; 6 – максимальное значение

Наиболее часто встречаемой фракцией в изученных почвах является фракция с диаметром 10–50 мкм (рис. 4б), среднее содержание которой равно 39,2%, а само распределение наиболее близко к нормальному. Также весьма широко распространены частицы размерами 1–5 и 50–250 мкм (средние содержания равны 17,9 и 16,7%, соответственно). Наибольшими коэффициентами вариации обладают частицы с размерами 250–1000 и >1000 мкм (186,6 и 346%, соответственно) – эта фракция наиболее контрастно распределена в почвенно-геохимической катене, особенно частицы с размерами >1000, которые вообще встречаются не повсеместно.

Групповой состав железа представлен в основном группой силикатных соединений, входящих в состав породообразующих минералов. Доля несиликатной группы соединений железа в составе валового содержания достигает всего 2% (табл. 2), такими содержаниями Фенс отличаются глубокие минеральные горизонты почв, что предполагает фракционирование железа в горизонтах с динамичными показателями окислительно-восстановительного потенциала и активными проявлениями процесса криогенного растрескивания, из-за которого кристаллические решётки минералов разрушаются и содержащиеся в них атомы Fe переходят в состав других химических соединений. Доля аморфной фракции, во-первых, очень мала в исследованных профилях почв – максимум до 0,6% (табл. 2), во-вторых, распределена в них практически (0,1–0,3%) равномерно (рис. 4а). Редкие исключения составляют высокие значения (выше 1%) Fe_a, предположительно, являющиеся свидетельством активного взаимодействия минеральной и органогенной фракции почв на границах соответствующих горизонтов.

Таблица 2. Физико-химические свойства почв УНП Хановей

Образец №	Глубина, см	pH	TDS, мг/л	Сорг., %	Физ. Глина, %	Fe _{Hc} , %	Fe _a , %
Kh-22-1/1	0-3(5)	5,2	81,6	35,9	14,9	0,2	0,1

код-заг- 1/2	сум- 13(34)	с,с	с,с	с,с	с,с	с,с	с,с
Kh-22- 1/3	13(34)- 28	6,3	5,5	1,7	33,6	0,2	0,1
Kh-22- 1/4	28- 47(80)	6,2	15,4	1,6	35,2	0,3	0,0
Kh-22- 1/5	47(80)- 120	7,3	22,0	4,1	28,9	0,8	0,6
Kh-22- 2/1	0-25	5,0	60,6	41,6	16,7	0,4	0,1
Kh-22- 2/2	25-29	6,4	17,1	3,9	40,7	0,4	0,1
Kh-22- 2/3	29-43	5,2	47,5	2,0	37,5	0,3	0,1
Kh-22- 2/4	43-48	5,8	58,3	0,5	32,5	2,0	1,1
Kh-22- 2/5	48-50	5,9	15,4	14,5	25,0	0,2	0,2
Kh-22- 2/6	50...	6,0	21,8	25,1	29,5	0,4	0,2
Kh-22- 3/1	0-1	5,5	105,0	8,5	18,1	0,3	0,1
Kh-22- 3/2	1--18	7,5	52,2	13,3	29,5	0,2	0,0
Kh-22- 3/3	18-40	5,6	8,4	1,3	47,0	0,4	0,1
Kh-22- 4/1	0-2(8)	5,7	33,9	9,6	30,9	0,5	0,1
Kh-22- 4/2	2(8)- 10(19)	7,1	9,8	2,3	43,4	0,5	0,3
Kh-22- 4/3	10--37	6,7	6,4	1,3	53,1	0,2	0,1
Kh-22- 4/4	10(19)- 37	6,7	7,5	3,0	36,7	0,7	0,1
Kh-22- 4/5	37+	7,2	17,7	2,7	39,2	0,5	0,0
Kh-22- 5/1	0-10	6,2	63,6	45,8	35,5	0,2	0,0
Kh-22- 5/2	10--44	5,1	34,3	39,7	32,2	0,2	0,1
Kh-22- 5/3	44-66	5,6	18,2	41,3	59,9	0,3	0,1
Kh-22- 5/4	66-100	5,9	9,4	35,2	40,0	0,1	0,1
Kh-22- 5/5	100-145	5,4	1,8	39,7	44,1	0,1	0,1
Kh-22- 6/1	0-1	5,7	5,5	2,0	42,0	0,2	0,1
Kh-22- 6/2	1--16	5,9	6,1	1,6	45,5	0,6	0,1

Kh-22-6/3	16...	6,5	5,9	0,6	26,2	0,2	0,1
Kh-22-7/1	0-3(7)	5,8	4,0	2,4	0,0	0,3	0,1
Kh-22-7/2	3(7)-11(18)	6,8	8,9	2,3	59,3	0,4	0,1
Kh-22-7/3	11(18)-70(72)	6,6	5,6	2,3	57,0	0,4	0,1
Kh-22-7/4	70 (72)...	5,6	11,3	2,0	37,5	0,2	0,0
Kh-22-8/1	0-2	4,7	121,0	42,9	6,6	0,1	0,0
Kh-22-8/2	2-11	5,5	50,6	35,3	16,0	1,8	0,0
Kh-22-8/3	11-21(23)	7,3	4,5	2,1	53,2	0,6	0,1
Kh-22-8/4	21(23)-27	6,1	23,0	5,4	36,4	0,3	0,1
Kh-22-8/5	27-31	5,6	34,0	2,1	42,4	0,2	0,1
Kh-22-8/6	31-45	5,3	39,0	38,4	12,0	0,4	1,3
Kh-22-8/7	45...	5,0	76,3	41,9	9,0	0,1	0,0
Kh-22-9/1	0-0,5	6,8	266,0	3,3	32,8	0,3	0,1
Kh-22-9/2	0,5-20	6,0	59,5	32,5	12,7	0,3	0,1
Kh-22-9/3	20...	6,9	23,7	3,4	34,5	0,3	0,1
Kh-22-10/1	0-12	7,1	27,0	3,7	27,6	0,2	0,1
Kh-22-10/2	12...	7,1	20,2	8,2	16,8	2,0	1,1

Таблица 3. Статистические значения физико-химических свойств почв УНП Хановей

Статистические показатели	pH	TDS, мг/л	ЕС, мкС/см	C _{орг} , %	Физ. глина, %	Fe _{НС} , %	Fe _а , %
Среднее арифметическое	6,1	35,4	70,7	14,3	33,5	0,4	0,2
Стандартное отклонение	0,8	45,8	91,5	16,4	13,3	0,4	0,3
Коэффициент вариации, %	12,4	129,3	258,7	114,5	39,9	100,3	166,6
Минимальное значение	4,7	1,8	3,6	0,5	6,6	0,1	0,0
Квартиль 25%	5,5	8,7	17,3	2,1	26,9	0,2	0,1
Медианное значение	5,9	20,2	40,4	3,9	34,5	0,3	0,1

Квартиль 75%	6,7	49,1	98,1	33,9	41,4	0,4	0,1
Максимальное значение	7,5	266,0	532,0	45,8	59,9	2,0	1,3

Таблица 4. Гранулометрический состав почв УНП Хановей (процентное содержание гранулометрических фракций (мкм) в %)

	Глубина, см	< 1	1--5	5--10	10--50	50--250	250--1000	>1000
Kh-22-1/1	0-3(5)	1,2	7,4	6,3	39,7	41,4	4	0
Kh-22-1/2	3(5)-13(34)	3,1	15,6	11,7	62,1	7,5	0	0
Kh-22-1/3	13(34)-28	5,6	19,4	8,6	58,5	7,9	0	0
Kh-22-1/4	28-47(80)	6,6	20,4	8,2	53,8	11	0	0
Kh-22-1/5	47(80)-120	3,2	16,8	8,9	30,7	39,3	1,1	0
Kh-22-2/1	0-25	1,1	7,6	8	18	26,3	38,4	0,6
Kh-22-2/2	25-29	5,3	23,3	12,1	54,1	5,2	0	0
Kh-22-2/3	29-43	5,8	21,9	9,8	57,8	4,7	0	0
Kh-22-2/4	43-48	7	16,1	9,4	54,9	12,6	0	0
Kh-22-2/5	48-50	2,8	13,4	8,8	50,5	24,5	0	0
Kh-22-2/6	50+	2,7	15,4	11,4	57,8	12,7	0	0
Kh-22-3/1	0-1	1,7	9,5	6,9	26,8	32,7	21,9	0,5
Kh-22-3/2	1--18	2,2	14,2	13,1	18,6	9,3	39,5	3,1
Kh-22-3/3	18-40	7,1	30,6	9,3	42,3	5,2	2,1	3,4
Kh-22-4/1	0-2(8)	4,2	17,2	9,5	46,3	22,8	0	0
Kh-22-4/2	2(8)-10(19)	6,3	26,2	10,9	53,1	3,5	0	0
Kh-22-4/3	10--37	8,7	32,3	12,1	40,8	6,1	0	0
Kh-22-4/4	10(19)-37	5,7	22,8	8,2	20,4	18,1	24,8	0
Kh-22-4/5	37+	5,2	23,2	10,8	51,3	9,5	0	0
Kh-22-5/1	0-10	6,3	17	12,2	28,4	32,9	3,2	0
Kh-22-	10--44	2.4	3.5	26.3	19.5	48.3	0	0

... - - 5/2	... - . 44-66	- , . 5,9	- , - 16,2	- , - 37,8	- , - 24,3	- , - 15,8	- 0	- 0
Kh-22- 5/3	44-66	5,9	16,2	37,8	24,3	15,8	0	0
Kh-22- 5/4	66-100	5	11,2	23,8	36,4	21,7	1,9	0
Kh-22- 5/5	100-145	6,5	27,1	10,5	52,9	3	0	0
Kh-22- 6/1	0-1	6,6	25,7	9,7	53,2	4,8	0	0
Kh-22- 6/2	1--16	9,1	27,9	8,5	48,9	5,6	0	0
Kh-22- 6/3	16+	4,3	14	7,9	65,2	8,6	0	0
Kh-22- 7/1	0-3(7)	1,6	11,3	23,9	58,3	4,9	0	0
Kh-22- 7/2	3(7)- 11(18)	8,2	36,2	14,9	39,2	1,5	0	0
Kh-22- 7/3	11(18)- 70(72)	8,4	35,9	12,7	39,3	3,7	0	0
Kh-22- 7/4	70(72)+	5,4	21,8	10,3	56	6,5	0	0
Kh-22- 8/1	0--2	0,5	3,1	3	4,5	10,3	67,6	11
Kh-22- 8/2	2--11	1	7,2	7,8	16,2	28	39,6	0,2
Kh-22- 8/3	11-21(23)	9,5	33,7	10	43,3	3,5	0	0
Kh-22- 8/4	21(23)-27	5,2	19,7	11,5	54,8	8,8	0	0
Kh-22- 8/5	27-31	6,8	25,5	10,1	52,9	4,7	0	0
Kh-22- 8/6	31-45	0,7	5,4	5,9	16,7	36,4	34,9	0
Kh-22- 8/7	45+	0,7	4,4	3,9	5,5	14,3	60,6	10,6
Kh-22- 9/1	0-0,5	3,7	19,3	9,8	31,7	35,4	0,1	0
Kh-22- 9/2	0,5-20	0,7	5,6	6,4	49,3	38	0	0
Kh-22- 9/3	20+	5	20,9	8,6	18	40,4	7,1	0
Kh-22- 10/1	0--12	3	15,6	9	25,7	17,1	29,6	0
Kh-22- 10/2	12+	4,8	7,2	4,8	9,7	24,6	48,9	0

3.3. Элементный состав криогенных почв УНП Хановей

Кремний и железо, как главные составляющие минералогической основы почв УНП Хановей, характеризуются наибольшими средними концентрациями среди всех

изученных элементов. Средние содержания Si и Fe в почвах варьируют в пределах от 2 до 4%, при этом соединения кремния распределены в почвах более нормально (рис. 5а), а для соединений железа более характерны весьма узкие квартили распределений и более широкий, по сравнению с кремнием, интервал распределения в целом (рис. 5а). Остальные макроэлементы – Mg, Al, Ca, Ti и Mn, – имеют концентрации, не превышающие 1,2%, из них наибольшие концентрации у Ca (до 1,18%), Al и Ti распределяются весьма широко с максимальными значениями концентраций, достигающими 1 и 0,92%, соответственно, а средние концентрации варьируют в пределах от 0,2 до 0,4%. Mg и Mn имеют концентрации, редко превышающие 0,1% (рис. 5а, табл. 5).

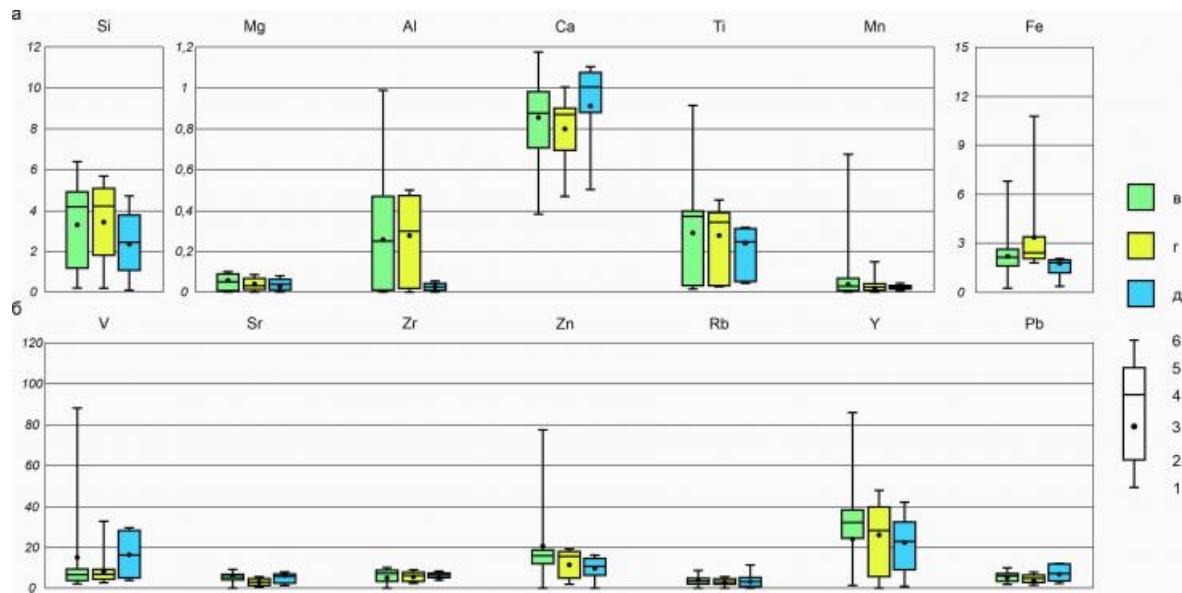


Рис. 5. Валовой элементный состав криогенных почв УНП Хановей: а) макроэлементы, б) микроэлементы; в) сезонно-талые горизонты; г) криогенные сезонно-талые горизонты; д) многолетнемёрзлые горизонты; 1 – минимальное значение; 2 – quartиль 25%; 3 – среднее значение; 4 – медианное значение; 5 – quartиль 75%; 6 – максимальное значение

Среди микроэлементов наибольшими концентрациями отличаются V, Zn и Y, в распределениях которых главной чертой является весьма расширенный диапазон варьирования концентраций в горизонтах сезонно-талого слоя без признаков криогенеза, а также широкий диапазон варьирования концентраций V и Y в многолетнемёрзлых горизонтах (рис. 5б). Остальные микроэлементы – Sr, Zr, Rb и Pb, – содержатся в почвах в весьма низких концентрациях, не превышающих 10 мг/кг (табл. 6).

Среди наиболее ярко выраженных признаков криогенного распределения элементов в почвах УНП Хановей обнаруживаются увеличения средних (около 1%) концентраций Ca (рис. 5а), квартили содержаний которого также смешены к верхним пределам содержания, относительно сезонно-талых и криогенных сезонно-талых горизонтов. Среди остальных макроэлементов наиболее значительно отличаются от двух других групп горизонтов содержание Al в горизонтах ММП (рис. 5а). Fe в многолетнемёрзлых горизонтах, напротив, распределено со снижениями средних значений и квартирьей содержаний к нижним пределам. Также Fe распределено в криогенных сезонно-талых горизонтах почв с повышением средних концентраций относительно сезонно-талых и многолетнемёрзлых, что особенно заметно на примере максимальных содержаний – 11% (в сравнении с сезонно-талыми – 7%; и многолетнемёрзлыми – 2%).

Таблица 5. Содержания макроэлементов в почвах УНП Хановей (в %)

Разрез	Глубина, см	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
Kh-22-1/1	0-3(5)	0,01	0,31	1,25	0,39	0,12	0,01	1,65
Kh-22-1/2	3(5)-13(34)	0,01	0,01	4,95	0,80	0,38	0,02	1,37
Kh-22-1/3	13(34)-28	0,01	0,50	5,59	0,91	0,43	0,02	1,92
Kh-22-1/4	28-47(80)	0,01	0,01	5,45	1,12	0,40	0,03	2,05
Kh-22-1/5	47(80)-120	0,01	0,01	4,34	1,05	0,32	0,06	2,27
Kh-22-2/1	0-25	0,01	0,01	0,58	0,60	0,07	0,66	3,54
Kh-22-2/2	25-29	0,01	0,37	6,24	0,82	0,45	0,03	2,57
Kh-22-2/3	29-43	0,01	0,43	4,04	0,96	0,35	0,04	3,10
Kh-22-2/4	43-48	0,01	0,37	0,19	0,43	0,03	0,16	10,92
Kh-22-2/5	48-50	0,01	0,01	3,69	0,98	0,36	0,06	2,44
Kh-22-2/6	50+	0,01	0,01	1,48	1,10	0,17	0,07	2,35
Kh-22-3/1	0-1	0,01	0,49	4,21	0,70	0,34	0,04	2,92
Kh-22-3/2	1--18	0,01	0,01	2,47	0,86	0,32	0,07	2,44
Kh-22-3/3	18-40	0,01	0,01	4,30	0,91	0,38	0,04	2,07
Kh-22-4/1	0-2(8)	0,01	0,35	4,18	0,85	0,34	0,05	2,61
Kh-22-4/2	2(8)-10(19)	0,01	0,42	6,03	0,86	0,41	0,04	2,70
Kh-22-4/3	10--37	0,01	0,01	3,31	0,91	0,34	0,04	2,81
Kh-22-4/4	10(19)-37	0,01	0,47	5,05	0,90	0,32	0,03	2,53
Kh-22-4/5	37...	0,01	0,48	3,10	0,92	0,35	0,04	2,76
Kh-22-5/1	0-10	0,01	0,23	0,90	0,99	0,32	0,02	0,80
Kh-22-5/2	10--44	0,01	0,85	1,20	0,95	0,25	0,03	0,40
Kh-22-5/3	44-66	0,01	0,27	1,10	0,88	0,75	0,08	0,56
Kh-22-5/4	66-100	0,01	0,97	0,80	0,55	0,95	0,08	0,97

Kh-22-5/5	100-145	0,01	0,13	0,40	0,74	0,48	0,05	0,83
Kh-22-6/1	0-1	0,01	0,56	4,98	0,84	0,38	0,03	2,64
Kh-22-6/2	1--16	0,01	0,49	4,00	1,01	0,36	0,07	3,16
Kh-22-6/3	16...	0,01	0,21	1,66	0,67	0,04	0,06	0,96
Kh-22-7/1	0-3(7)	0,01	0,01	4,79	0,85	0,39	0,03	2,26
Kh-22-7/2	3(7)-11(18)	0,01	0,01	3,09	0,80	0,35	0,03	2,68
Kh-22-7/3	11(18)-70(72)	0,01	0,46	5,00	0,97	0,40	0,08	3,45
Kh-22-7/4	70 (72)...	0,01	0,46	5,61	0,87	0,40	0,03	2,22
Kh-22-8/1	0--2	0,01	0,01	0,18	0,45	0,01	0,02	0,36
Kh-22-8/2	2--11	0,01	0,25	0,20	0,44	0,01	0,15	7,04
Kh-22-8/3	11-21(23)	0,01	0,01	5,65	0,85	0,41	0,04	2,64
Kh-22-8/4	21(23)-27	0,01	0,50	5,17	1,11	0,36	0,06	2,20
Kh-22-8/5	27-31	0,01	0,55	4,45	0,89	0,41	0,03	2,21
Kh-22-8/6	31-45	0,01	0,23	0,20	0,59	0,01	0,04	4,76
Kh-22-8/7	45...	0,01	0,01	0,13	0,51	0,11	0,07	0,20
Kh-22-9/1	0-0,5	0,01	0,01	4,51	1,19	0,31	0,07	2,28
Kh-22-9/2	0,5-20	0,01	0,01	1,45	0,61	0,08	0,03	2,58
Kh-22-9/3	20...	0,01	0,01	5,48	0,89	0,22	0,05	1,88
Kh-22-10/1	0--12	0,01	0,01	4,60	1,09	0,38	0,02	2,39
Kh-22-10/2	12...	0,01	0,01	4,35	1,02	0,30	0,05	2,26

Таблица 6. Содержания микроэлементов в почвах УНП Хановей (в г/кг)

Разрез	Глубина, см	V	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Pb
Kh-22-1/1	0-3(5)	5	0,9	1,9	4,5	0,7	6,1	3,8
Kh-22-1/2	3(5)-13(34)	5	1,6	5,4	16,1	2,2	36,8	2,1
Kh-22-	13(34)-	5	3.7	6.1	19.3	2.3	42.8	1.4

... - - 1/3	- - - , 28	-	- , -	- , -	- - , -	- , -	- - , -	- , -
Kh-22- 1/4	28- 47(80)	5	4,9	6,1	20,4	3,4	39,8	1,7
Kh-22- 1/5	47(80)- 120	29,6	4,9	5	14,3	2,1	43,4	1,7
Kh-22- 2/1	0-25	5	5,5	1	7,2	1,3	5,3	1,5
Kh-22- 2/2	25-29	5	4,8	7	17,3	2,8	39,3	1,4
Kh-22- 2/3	29-43	5	5,8	6,9	18,7	3,2	33,6	5
Kh-22- 2/4	43-48	5	1,3	5	3,2	5	1	3,1
Kh-22- 2/5	48-50	26,2	7,7	5	17,3	3	31,6	1,4
Kh-22- 2/6	50+	5	6,7	3,4	9,3	11,6	12,8	5
Kh-22- 3/1	0-1	23,2	4,5	6,7	12,7	2,3	28,4	3,7
Kh-22- 3/2	1--18	5	4,6	5,3	14	2,8	27	1,1
Kh-22- 3/3	18-40	5	2,8	5,7	18,3	3,2	47,9	1,4
Kh-22- 4/1	0-2(8)	5	4,8	5,7	16	2,4	32,2	1,6
Kh-22- 4/2	2(8)- 10(19)	5	4,6	6,5	17,8	3,2	35,2	5
Kh-22- 4/3	10--37	27,5	4,9	7,3	18	3,1	34,6	1,8
Kh-22- 4/4	10(19)- 37	5	5	5,2	15	2,5	24,6	5
Kh-22- 4/5	37+	29,8	4,8	6,6	15,8	2,8	28,6	1,4
Kh-22- 5/1	0-10	34	4,5	8,4	49,8	4,5	76,9	3,2
Kh-22- 5/2	10--44	76,5	7,8	3,4	35,1	9,6	37,5	1,6
Kh-22- 5/3	44-66	3,4	2,5	7,8	78,4	2,3	28,7	6,4
Kh-22- 5/4	66-100	87	9,8	2,3	52,9	7,2	75,3	5,3
Kh-22- 5/5	100-145	4,5	5,6	2,6	38,5	1,8	86,3	5,8
Kh-22- 6/1	0-1	5	4,8	6,2	17,8	2,9	37,3	1,6
Kh-22- 6/2	1--16	5	4,8	6,7	16,7	2,9	30,8	1,5
Kh-22- 6/3	16+	5	4,8	2,3	2	0,4	2,6	4,5

Kh-22-7/1	0-3(7)	5	4,8	6,5	17,2	2,6	41,2	1,3
Kh-22-7/2	3(7)-11(18)	5	4,8	6	16,7	2,8	32,6	1,9
Kh-22-7/3	11(18)-70(72)	5	4,8	6,8	17,5	3	22,7	1,4
Kh-22-7/4	70(72)+	34,5	4,8	6,9	18,2	2,2	41,3	1,8
Kh-22-8/1	0--2	5	4,8	0,4	1,1	1,1	1,2	8,5
Kh-22-8/2	2--11	5	4,8	5	1,6	5	5	4,2
Kh-22-8/3	11-21(23)	5	4,8	6,9	17,7	2,7	38,5	1,7
Kh-22-8/4	21(23)-27	5	4,8	6,2	19,4	2,9	37,8	1,7
Kh-22-8/5	27-31	5	4,8	6,5	16,9	2,5	38,3	1,7
Kh-22-8/6	31-45	5	4,8	5	15,2	2,3	27,5	5
Kh-22-8/7	45+	5	4,8	5	0,9	0,9	1,1	9,6
Kh-22-9/1	0-0,5	5	4,8	5	15,2	2,3	27,5	5
Kh-22-9/2	0,5-20	5	4,8	2	4,1	1,7	4,5	5
Kh-22-9/3	20+	5	4,8	4,3	11,4	1,6	18,3	5
Kh-22-10/1	0--12	5	4,8	4,9	14,5	2,3	40,3	1,3
Kh-22-10/2	12+	5	4,8	4	11,2	1,7	33,1	1,7

3.4. Радиальная дифференциация криогенных почв УНП Хановей

Радиальная дифференциация концентраций химических элементов в почвах УНП Хановей представляет собой разнообразные картины профильных распределений, среди которых выделяются следующие основные закономерности, встречающиеся наиболее часто: 1) обогащение большей части криогенных сезонно-тальных горизонтов почв (Gcf@, CG@, CRg, CRM) многими элементами, концентрация элементов с переменной степенью окисления (Fe, Mn) и некоторых других в глеевых горизонтах, либо в горизонтах, проявляющих признаки оглеения (G, CRg, O/Cg, Gox и др.), а также относительно равномерные распределения концентраций большей части элементов в минеральных горизонтах почв без визуально выраженных признаков криогенеза.

Накопление макро- и микроэлементов в поверхностных торфяных горизонтах почв, скорее всего, связано с атмосферным поступлением содержащих их частиц на поверхность почв в результате длительного переноса промышленных выбросов крупных городов (Воркута и её города-спутники) в составе воздушных масс. Заметно, что торфяные горизонты (T) более высокой мощности обладают повышенной способности к аккумуляции элементов, по сравнению с горизонтами подстилок (O). В то время как

значения коэффициентов R для горизонтов подстилок чаще всего примерно сопоставимо с почвообразующей породой или даже демонстрирует рассеяние ($1 \geq R$) (рис. 6а, в, г, е, ж), то в торфяных горизонтах зачастую наблюдаются примерно двух- и более кратные превышения концентраций Al, Si, Ti, Mn, Sr, Y и Zr в горизонтах Т относительно С ($R \geq 2$).

По-видимому, процессы криогенного оструктурирования в горизонтах почв CR и CRM и параллельно развивающейся в ней в период промерзания восстановительной обстановки (морфологические признаки которой сохраняются в почвах и в период талого состояния), способствуют накоплению в них таких элементов, как Mn ($R_{Mn} = 2,1$) (рис. 6в), Al ($R_{Al} = 2,3$), Ti ($R_{Ti} = 8,9$) (рис. 6е), Rb, Sr и др. Многолетнемёрзлые горизонты почв редко создают контрасты профильных распределений ввиду того, что надмерзлотные горизонты (CGcf@, CG@, Gox), проявляющие функции радиальных геохимических барьеров по отношению к Si, Ti, V, Sr, Zr и др. металлам, способствуют замедлению вертикальной миграции веществ на пути от поверхности почвы к верхней границе ММП.

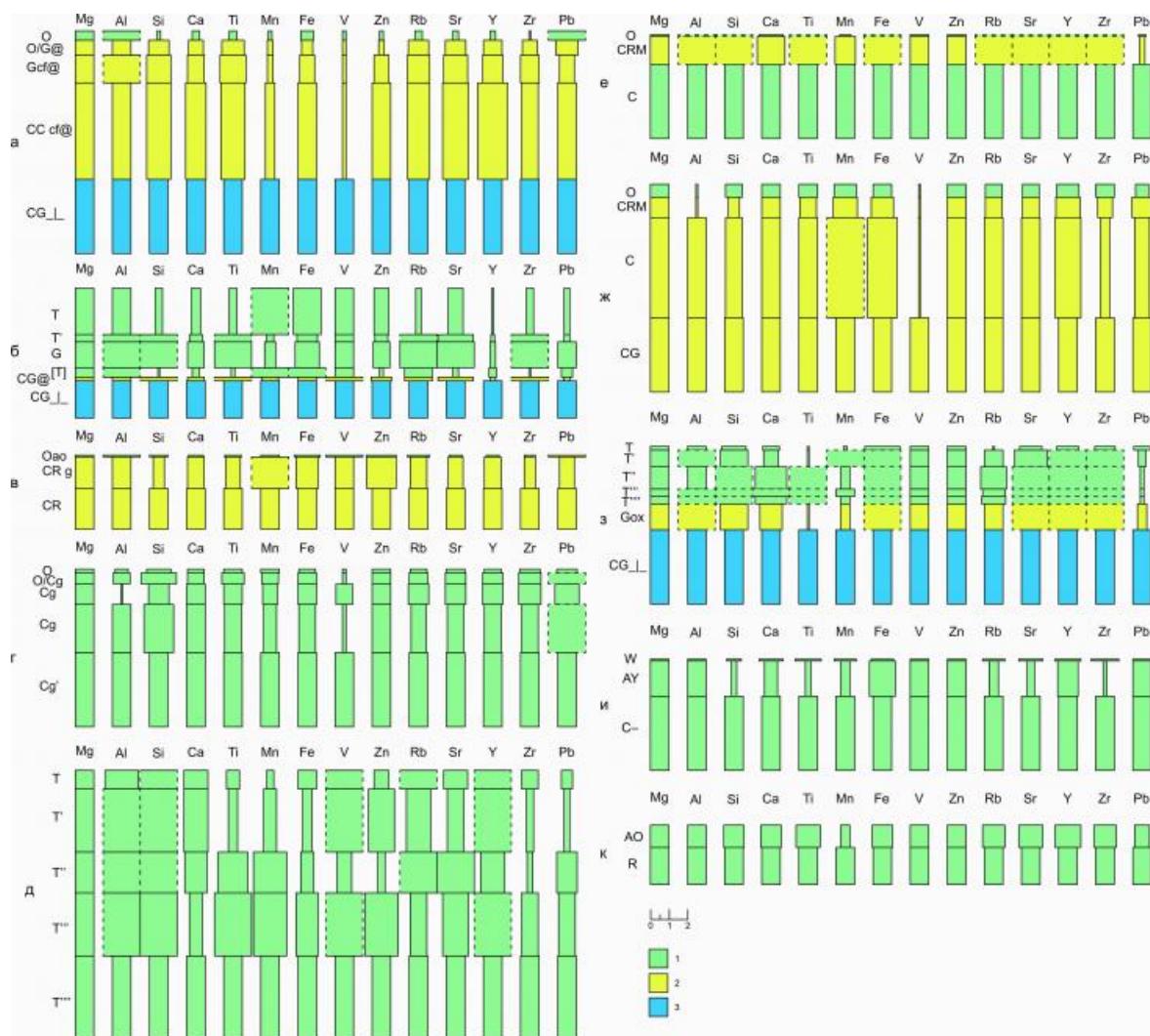


Рис. 6. Радиальная дифференциация криогенных почв УНП Хановей: а) криозём криогенно-ожелезнённый поверхностно- и надмерзлотно-глеевый тиксотропный, б) торфяно-глеевый криогенно-ожелезнённый, в) криозём глеевый тиксотропный, г) криозём глееватый на древнеаллювиальных отложениях, д) торфяная олиготрофная почва, е) криометаморфическая глееватая, ж) криометаморфическая надмерзлотно-глееватая, з) торфяно-глеевый окисленно-глеевый мерзлотный, и) аллювиальная гумусовая почва, к) серогумусовая грубогумусированная почва на валунисто-галечниковом аллювии; 1 – сезонно-талые горизонты; 2 – криогенные сезонно-талые

горизонты; 3 – многолетнемёрзлые горизонты

3.5. Латеральная дифференциация криогенных почв УНП Хановей

В качестве латеральных геохимических барьеров на пути субгоризонтальной водной миграции веществ в почвенно-геохимических катенах на УНП Хановей чаще всего выступают сезонно-талые органогенные горизонты ($L_{Tl} = 2,6$, $L_{Al} = 1,3$, $L_V = 8,2$ и т.п.) мощного торфяника (Э₂ геохимический ландшафт) (рис. 7). Также весьма контрастными распределениями характеризуются концентрации Mn и Fe в группе геохимических ландшафтов первой надпойменной террасы, что, предположительно, связано с развитой здесь глеевой обстановкой в торфяно-глеезёмах и криозёмах криогенно-ожелезнённых, глееватых и глеевых, а резкий рост содержаний Ti, V и Sr ($L = 1,7-2,9$), возможно объяснить, наоборот, аэрацией почвенного профиля более лёгкого (песчаного) гранулометрического состава и, соответственно, окислительной средой, развитой здесь. Таки образом, мобилизованные при восстановлении в верхней части катены соединения элементов здесь иммобилизуются при впадении в осадок в результате окисления (рис. 7).

В криогенных сезонно-талых горизонтах латеральная дифференциация слабоконтрастна у большей части элементов. Исключение составляет повышенное значение коэффициента $L_V = 3$ в ландшафтах склона второй надпойменной террасы. Мы связываем это проявление со сменой литологического состава почвообразующих пород с торфяных отложений на покровные суглинки.

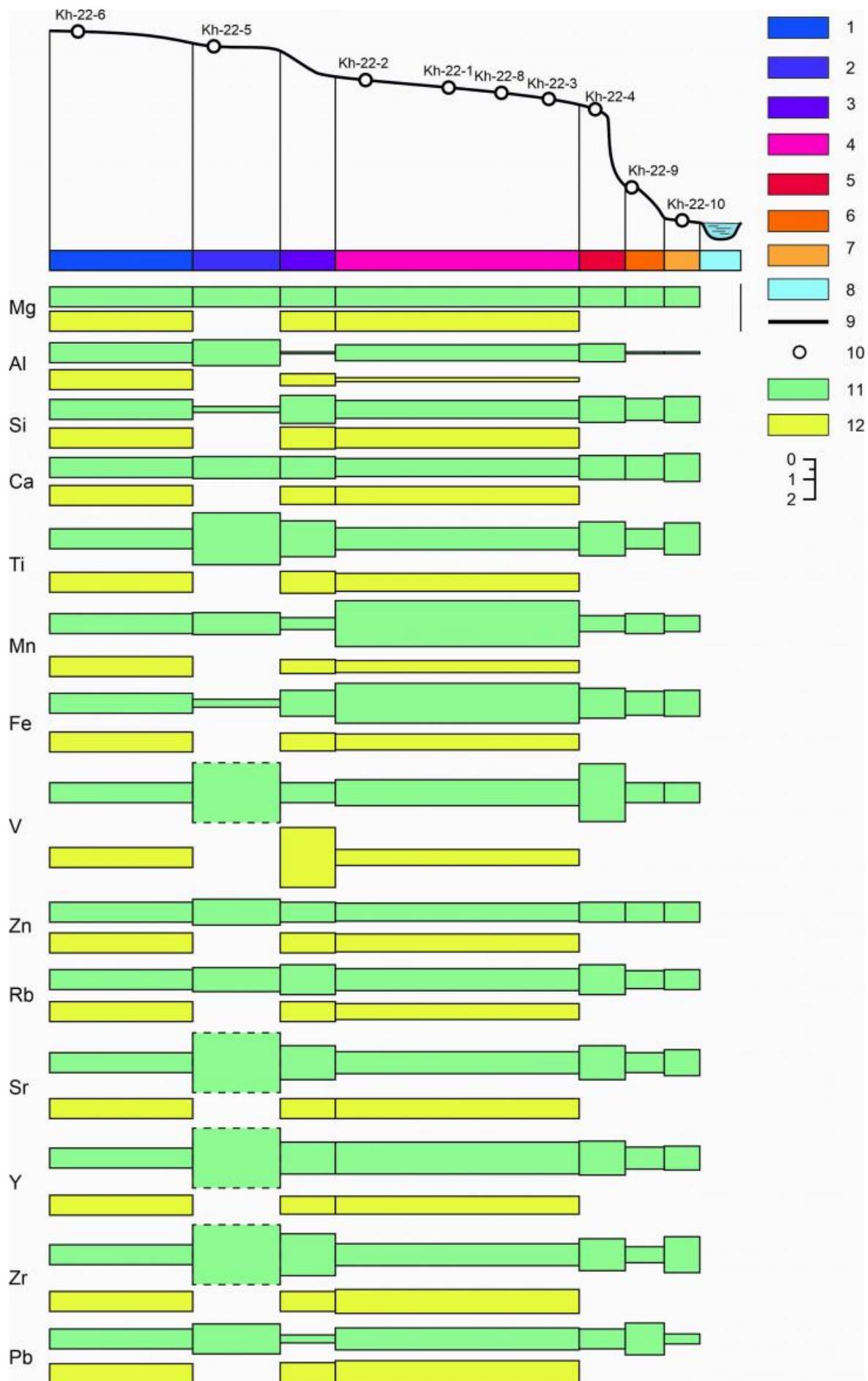


Рис. 7. Латеральная дифференциация химического состава криогенных почв УНП Хановей. Элементарные геохимические ландшафты: 1 – элювиальный первого порядка

(Э_{1R}); 2 – элювиальный второго порядка (Э₂); 3 – трансэлювиальный со слабым выносом (ТЭ₁); 4 – элювиальный второго порядка (Э2); 5 – трансэлювиальный с активным выносом (ТЭ₃); 6 – трансэлювиально-аккумулятивный (ТЭА); 7 – супераквальный транзитный (СТ₃); 8 – аквальный (А). Прочие обозначения: 9 – профиль рельефа; 10 – местоположения почвенных разрезов; 11 – сезонно-талые горизонты; 12 – криогенные сезонно-талые горизонты

4. Дискуссия

4.1. Радиальные распределения

Верхние горизонты почв обладают повышенной депонирующей способностью по отношению к Fe и Mn (содержание подвижных форм Fe = 176 ± 72,2; Mn = 13,5 ± 8,5, что в 1,5–9 раз выше в горизонтах A0, A, по сравнению с горизонтом Bm) и относительно низкой – к Ca и Mg (в 2,5–3 раза выше содержание в горизонтах Bm, по сравнению с A0, A), что наблюдалось Д.С. Скрябиной в мерзлотных почвах Якутии.^[21] Аналогичные наблюдения о концентрации железа и марганца в органогенных горизонтах почв УНП Хановей были сделаны как нами, так и другими исследователями в Большеземельской тундре.^[20] На юго-востоке Большеземельской тундры многие микроэлементы отличаются выносом из поверхностных органогенных горизонтов и зоны аэрации с накоплением на верхней границе глеевого горизонта: Cu (увеличение от 4–6 до 14 мг/кг), Pb (от 6 – 8 до 9 мг/кг), Cd (от 0,17 до 0,24 мг/кг), Zn (от 25 до 40 мг/кг), Co (от 4,2 до 10,2 мг/кг) и т.д.^[24] В почвах Большеземельской тундры профильное распределение концентраций микроэлементов отличается следующими чертами: As – распределён равномерно в горизонтах с высокими содержаниями Сорг и окислительной средой (в районе 1–2 мг/кг), а в глеевых горизонтах он накапливается, Pb и Cu распределены в профилях почв относительно равномерно, а Zn характеризуется, напротив, биогенной аккумуляцией, что выражается в накоплении этого металла в верхних горизонтах почв.^[10]

4.2. Латеральные распределения

М.П. Тентюковым^[22] были определены следующие статистические параметры распределения элементов-примесей (микроэлементов) в почвах двух основных типов ландшафтов южной части Большеземельской тундры – озёрно-болотных равнин и эрозионно-аккумулятивных равнин (табл. 7). В автоморфных почвах эрозионно-аккумулятивных равнин профильные распределения микроэлементов в почвах довольно контрастны с накоплением Zr, V и Ti в средней части профиля, а Mn аккумулируется в органогенных горизонтах. Первое явление, скорее всего, связано с элювиальным процессом, второе – с биогенной аккумуляцией. Многие элементы накапливаются на верхней границе тиксотропного горизонта в результате осаждения гидроксидами Fe и частичной сорбцией глинистыми частицами. Таким образом, отмечается совокупное влияние этих двух факторов на профильное распределение.

Таблица 7. Статистические параметры распределения элементов-примесей в ландшафтах южной подзоны Большеземельской тундры, г/т (по ^[22])

Элементы	Озёрно-болотные равнины (ландшафты многоозерья), n = 826				Эрозионно-аккумулятивные равнины, n = 375			
	О1	Ме	О3	КК	О1	Ме	О3	КК

I. Типичные катионогенные элементы-литофилы								
Sr	178	278	464	1,0	158,5	251	316	0,9
II. Элементы-литофилы с постоянной валентностью								
Y	10	35,9	59	1,2	6,3	10	15,8	0,3
III. Элементы-литофилы с переменной валентностью								
Ti	3160	7700	10000	2,3	630	1000	3160	0,3
Zr	100	166	278	1,0	39,8	63,1	15,8	0,4
V	77,4	110,2	1,66	1,2	7,9	31,6	50,1	0,3
IV. Металлы-сульфофилы								
Zn	77,4	166	215	3,9	31,6	50,1	100	1,2
Pb	10	16,7	21,5	1,4	6,3	10	31,6	0,8
V. Металлы-сидерофилы								
Mn	278,3	464,2	774	0,6	100	199	501	0,2

Примечание: Q1 – первый квартиль (25%), Me – медианное значение, Q3 – третий квартиль (75%), KK – кларк концентрации

Немного иное распределение наблюдается в профиле поверхностно-глеевых почв в трансэлювиальном геохимическом ландшафте склона. Слабовыраженный тиксотропный горизонт в средней части почвенного профиля, в котором проявляется признак процесса криогенного ожелезнения, отмечается накопление Mn и Zr. В трансаккумулятивном ландшафте аллювиальная дерново-глеевая почва отличается относительно слабым накоплением Ti и Zr в глеевом горизонте G [22, 23].

В тундровых почвах проявляется наибольшая контрастность латеральных геохимических барьеров по отношению к Fe, Mg, Pb, Sr и другим металлам. Особенно контрастны геохимические барьеры в подчинённых геохимических ландшафтах. [20]

5. Заключение

Изучены криогенные почвы на учебно-научном полигоне Хановей, расположеннном в 30 км южнее г. Воркуты в Республики Коми. Физико-географически исследованный район относится к юго-западной части Большеземельской тундры и почвы данного района были классифицированы как криозёмы, торфяно-глеезёмы, криометаморфические, аллювиальные и серогумусовые. В них чаще других проявляются признаки криогенного ожелезнения, оглеения и т.п. процессов. Почвы относятся к кислым и близким к нейтральным по кислотности реакции, содержание водорастворимых солей в них чаще всего не превышает 100 мг/л, содержание Сорг достигает 45%, поскольку торфоаккумуляция здесь крайне активна. По гранулометрическому составу горизонты почвы варьируют от песчаных до тяжелосуглинистых и легкоглинистых, резкая смена гранулометрического состава почвообразующих пород происходит при переходе от поверхности первой надпойменной террасы р. Воркуты к её склону. Валовой состав железа представлен в основном группой силикатных соединений, несиликатная фракция достигает концентраций в районе 2%, а аморфная фракция вообще малочисленна.

Среди картин радиальной дифференциации концентраций химических элементов в почвах УНП Хановей выделяются следующие: 1) большая часть криогенных сезоннотальных горизонтов почв обогащена многими элементами, 2) концентрация элементов с переменной степенью окисления в глеевых горизонтах, 3) относительно равномерные распределения концентраций в минеральных горизонтах почв без признаков криогенеза. Торфяные горизонты (Т) более высокой мощности обладают повышенной способности к

аккумуляции элементов, по сравнению с горизонтами подстилок (О). R для горизонтов подстилок чаще всего сопоставимы с почвообразующей породой или даже демонстрирует рассеяние. Процессы криогенного оструктуривания в горизонтах почв СР и CRM и параллельно развивающейся в ней восстановительной обстановки способствуют накоплению в них Mn ($R_{Mn} = 2,1$), Al ($R_{Al} = 2,3$), Ti ($R_{Ti} = 8,9$), Rb, Sr и др.

В качестве латеральных геохимических барьеров в почвенно-геохимических катенах выступают сезонно-тальные органогенные горизонты ($L_{Ti} = 2,6$, $L_{Al} = 1,3$, $L_V = 8,2$ и т.п.) мощного торфяника (Э₂ геохимический ландшафт). Также весьма контрастными распределениями характеризуются Mn и Fe в ландшафтах первой надпойменной террасы, а резкий рост содержаний Ti, V и Sr ($L = 1,7-2,9$) в них, наоборот, связан с аэрацией почвенного профиля песчаного гранулометрического состава. В криогенных сезонно-тальных горизонтах латеральная дифференциация слабоконтрастна у большей части элементов.

Подробно изучена почвенно-геохимическая структура южнотундровых ландшафтов юго-востока Большеземельской тундры в долине р. Воркуты. Эти данные позволяют уточнить особенности функционирования геохимических ландшафтов ряда районов Российской Арктики и Субарктики.

Библиография

1. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. – Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2010. 356 с. + илл. карты.
2. Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И. Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2012. №1. С. 23 – 28.
3. Буданцева Н.А., Горшков Е.И., Исаев В.С., Семенков И.Н., Усов А.Н., Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические особенности бугристых ландшафтов в районе учебно-научного полигона «Хановей» // Инженерная геология, 2015. №3. С. 34 – 50.
4. Васильчук Ю.К. Современное положение южной границы зоны многолетнемёрзлых пород Западно-Сибирской низменности // Криосфера Земли, 2013. Т. XVII, №1. С. 17 – 27.
5. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю. Криогенные почвы на учебном полигоне Хановей, Воркутинский район, Республика Коми // Арктика и Антарктика, 2022. №3. С. 92 – 126. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.3.39001
6. Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР. Л.: Наука. 1989. 64 с.
7. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1988. – 357 с.
8. Геологические и геоморфологические карты / Б.И. Гуслицер, В.А. Разницын, М.В. Фишман, Г.А. Чернов // Атлас Коми АССР. – М.: 1964. С. 9 – 18.
9. Девятова Э.И. О краевых образованиях Валдайского ледника на территории Архангельской области // Труды комиссии по изучению четвертичного периода, вып. 21. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 5 – 15.
10. Дымов А.А., Лаптева Е.М., Калашников А.В., Денева С.В. Фоновое содержание тяжёлых металлов, мышьяка и углеводородов в почвах Большеземельской тундры // Теоретическая и прикладная экология, 2010. №4. С. 43 – 48.

11. Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
12. Климат Воркуты: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/23226.htm> (дата обращения 21.03.2023).
13. Леса Республики Коми / Г.М. Кобузов, А.И. Таскаев, С.В. Дегтева и др. – М.: Дизайн. Информация. Картография. 1999. 332 с.
14. Осадчая Д.Г. Особенности ландшафтной индикации геокриологических условий в большеземельской тундре // Материалы XII международной ландшафтной конференции «Ландшафтovedение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития» (Тюмень-Тобольск, 22 – 25 августа 2017 г.). – Изд-во Тюменского государственного университета, 2017. Т. 2. С. 389 – 391.
15. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк., 1975. 394 с.
16. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрея, 1999. 764 с.
17. Полевой определитель почв. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с.
18. Растительность европейской части СССР / Под ред. С.А. Грибовой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. – Л. Наука, 1980. 429 с.
19. Семенков И.Н. Формы нахождения металлов в суглинистых тундровых, таёжных, подтаёжных и лесостепных почвенно-геохимических катенах / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата географических наук. – М.: 2016а. 24 с.
20. Семенков И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таёжных и лесостепных катенах восточно-европейской равнины // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География, 2016б. №3. С. 29 – 39.
21. Скрябина Д.С. Состояние соединений железа в мерзлотно-таёжных почвах / Диссертация на соискание учёной степени кандидата биологических наук // ФГБУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. М.: 2016. 224 с.
22. Тентюков М.П. Геохимия ландшафтов равнинных тундр (на примере Ямала и Большеземельской тундры). – Сыктывкар, 2010. – 260 с.
23. Тентюков М.П. Особенности распределения химических элементов в мёрзлых почвах // Криосфера Земли, 2013. Т. XVII, №3. С. 100 – 107.
24. Шахтарова О.В. Микроэлементы в структурных компонентах почв юго-востока Большеземельской тундры // Материалы XXIII Всероссийской молодёжной научной конференции (с элементами научной школы) «Актуальные проблемы экологии и биологии» (Сыктывкар, 04 – 08 апреля 2016 г.). Институт биологии Коми Научного Центра УрО РАН, 2016. С. 133 – 138.
25. Oberman N.G., Mazhitova G.G. Permafrost dynamics in the Northeast European Russia based on the period pf climatic warming 1970 – 1975 // Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography, 2001. Vol. 55. No 4. P. 241 – 244. DOI: 10.1080/00291950152746595

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, геохимический состав криогенных почв его пространственная дифференциация на примере учебно-научного полигона Хановей в Большеземельской тундре.

Методология исследования, в статье указана характеристика полигона, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов анализа проб в химико-аналитической лаборатории эколого-геохимического центра (ЭГЦ) географического факультета МГУ (г. Москва) аналитические показатели почв: кислотность водной вытяжки (рН), общее содержание легкорастворимых солей (TDS), общее содержание органического углерода (Сорг.), гранулометрический состав почв, концентрации несиликатного (Фенс) и оксалаторастворимого (Fea) железа в почвах, а также валовое содержание макро- и микроэлементов., а также анализ литературных данных.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о таяние многолетнемёрзлых пород в результате климатических изменений особенно ярко проявляется в районе южной границы криолитозоны, увеличение мощности сезонноталого слоя почв из года в год способствует росту глубины протекания активной миграции химических веществ и снижению контрастности профильных распределений содержания химических элементов. Это позволяет выявить последствия для изменения погодно-климатических условий.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделает вывод об комплексного изучения многолетнемёрзлых пород. Это является важным направлением в развитии геокриологии.

Стиль, структура, содержание стиля изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим физико-химические свойства криогенных почв разной фракции. Автором были классифицированы почвы данного района как криозёмы, торфяно-глеезёмы, криометаморфические, аллювиальные и серогумусовые, подробно рассмотрен элементный состав криогенных почв, радиальная и латеральная дифференциация химического состава криогенных почв, определены статистические параметры распределения примесей микроэлементов, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Однако есть ряд вопросов, в частности:

Автору статьи следовало бы выделить разделы статьи для лучшего восприятия целевую установку и задачи исследования.

Автору следуют проверить стилистические и орфографические неточности (например: «Эти данные позволяют уточнить особенности функционирования...»).

Из приведенных автором направлений следует отметить особенно интересный кроме изучения особенностей функционирования геохимических ландшафтов ряда районов Российской Арктики и Субарктики следует обратить внимание на скорость миграции и объем геохимических процессов на процессы изменения почвы на фон изменений климатических условий.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на методические рекомендации и технологические особенности анализа почв и грунтов.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.