

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. — Радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Чары, Северное Забайкалье // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.2.40965
EDN: HGVJAS URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40965

Радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Чары, Северное Забайкалье

Васильчук Юрий Кириллович

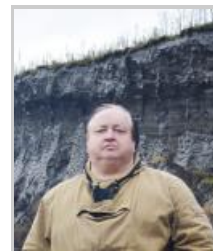
ORCID: 0000-0001-5847-5568

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

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

119991, Россия, Leninsky Gory область, г. Moscow, ул. Leninsky Gory, 1, оф. 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.2.40965

EDN:

HGVJAS

Дата направления статьи в редакцию:

10-06-2023

Аннотация: Предметом исследования являются содержания химических элементов, групповой состав соединений железа и их радиальная дифференциация в профилях криогенных почв долины р. Чары (северное Забайкалье). Изученные почвы относятся к глеезёмам постпирогенным мерзлотным, глубины СТС данных почв составляют от 34 до 44 см. Сроки прохождения пожаров – 3 и 28-30 лет для почв на правом и левом берегах ручья Беленького, соответственно. Концентрации макроэлементов, за исключением Si,

редко превышают 5,0%, в то время как содержание кремния достигает 24,3%. Для Si также характерен вынос из верхней части почвенных профилей и аккумуляция в мерзлотных горизонтах почв. Для значительной части макроэлементов, характерны наибольшие концентрации в горизонтах O (к примеру, это Mg – 4,8, Ca – 1,5 и др.). Среди микроэлементов наиболее контрастно распределены Sr и Zr (от 5,0 до 29,7 и от 5,6 до 47,1 мг/кг). Обеднение верхней части профиля глеезёма постпирогенного мерзлотного большей частью химических элементов, за исключением Mn, и значения коэффициента R от 0,3 до 0,9 свидетельствуют о начальной стадии постпирогенного восстановления свойств почвы, а наблюдающееся в профиле глеезёма окисленно-глеевого постпирогенного мерзлотного активное накопление в верхней части Mg, Ca, Ti, Fe, Sr и др. элементов – признак активного восстановления после пожара. В почвах содержится около 3,4% железа, из них более 60–75% составляет силикатная группа соединений (Fes). Влажность почв и преобладающие восстановительные условия среды способствуют формированию в их профилях монотонных распределений, а в почвах без признаков устойчивого гидроморфизма горизонты ММП содержат почти в 2 раза больше Feокс и Feэкстр.

Ключевые слова:

криогенные почвы, радиальная дифференциация, макроэлементы, микроэлементы, соединения железа, профильные распределения, многолетнемерзлые породы, сезонно-талый слой, Чарская котловина, Северное Забайкалье

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

Введение

Коэффициент радиальной дифференциации (R), предложенный А.И. Перельманом и Н.С. Касимовым^[15] предназначен для исследования неоднородности вертикального распределения концентраций химических веществ в почвенных профилях. В отличие от формы графика профильного распределения, которая даёт лишь качественную характеристику неоднородности распределения, коэффициент радиальной дифференциации демонстрирует количественную оценку влияния почвообразования на накопление и рассеивание отдельных химических веществ в горизонтах почвенного профиля. Сравнение проводится между затронутыми процессами почвообразования горизонтами верхней части профиля и горизонтами почвообразующих пород, эффект от почвообразования в которых условно отсутствует. Исследования профильных распределений химических элементов в почвах криолитозоны – весьма перспективное направление современной геохимии ландшафтов по следующим причинам. Во-первых, изучение радиальной водной миграции элементов и соединений в мерзлотных почвах может быть полезным с точки зрения их участия в биогеохимических циклах, которые не до конца исследованы в северных экосистемах.^[14] Во-вторых, исследование почв, загрязнённых различными химическими веществами, в том числе, потенциально токсичными, актуально в связи с хозяйственным освоением Арктической зоны России, где сосредоточены многочисленные промышленные производства.^[1] В-третьих, всестороннее изучение процессов почвенного криогенеза, в том числе его роли в формировании профильных распределений отдельных элементов (например, железа), на данном этапе развития криопедологии входит в число важнейших её задач.^[11] Чарская

котловина – один из ключевых районов, где проводятся различные работы по изучению криолитозоны [8,12,17], в связи с чем возможно всестороннее исследование криогенных почв и их особенностей. [4]

1. Объекты и методы

1.1. Географическое положение района исследования

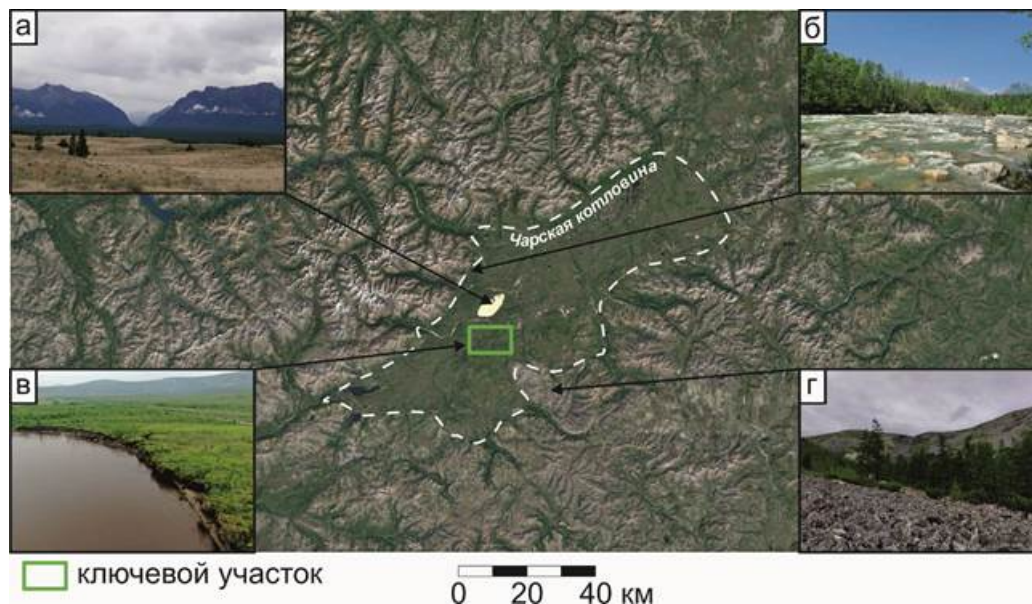


Рис. 1. Расположение ключевого участка исследования на территории Чарской котловины и её ландшафтное разнообразие: краевая область урочища Пески (а), нижнее течение реки Средний Сакукан (б), долина реки Чары (в), курумы западного макросклона хребта Удокан (г)

1.2. Физико-географические условия района исследования

Расположение ключевого участка исследования

Район исследования расположен в Каларском районе Забайкальского края. Ключевой участок находится в долине реки Чары, в её среднем течении, в 8 км к юго-западу от пгт. Новая Чара, в месте впадения ручья Беленького в Чару (56°45'38.72" с.ш., 118°11'30.12" в.д.) (рис. 1). Почвенные разрезы заложены на плоской пологонаклонной поверхности первой надпойменной террасы реки Чары высотой 7 м над уровнем уреза реки. Разрез Ch-22-1 расположен на правом берегу ручья, разрез Ch-22-2 – на левом берегу. На правом берегу наблюдаются признаки заболоченности поверхности, вероятно, ввиду недавно произошедшего здесь природного пожара, о котором свидетельствуют как обгоревшие стволы лиственниц, так и постпирогенные признаки в органогенном горизонте почв на этом участке. Левый берег ручья не проявляет признаков заболоченности поверхности.

Краткая физико-географическая характеристика района

Равнинная часть дна Чарской котловины представляет собой низменность в долине р. Чары, вытянутая вдоль её русла на 125 км низменность шириной около 35 км. Прирусловая часть котловины сложена голоценовыми русловыми фациями аллювиальных отложений (возраста Q1IV – Q2IV) различного гранулометрического состава, слагающих пойму и низкие террасы р. Чары. [7,16] Более высокие террасы левобережья Чары сложены позднечетвертичными водно-ледниковыми отложениями – песками и супесями.

Местами на территории котловины встречаются конечно-моренные гряды с заозёрными понижениями, а останцы коренных пород представляют собой цепи плосковершинных холмов высотами до 200 м. В целом, перепады высот в пределах днища котловины составляют как раз примерно 200 м, в отдельных случаях она увеличивается до 400 м. Климат Чары – резко-континентальный, среднегодовая температура воздуха около –7,8°С, количество осадков за год не превышает 330 мм. Мощность снегового покрова зимой не превышает 0,5 м в среднем из-за малого количества атмосферных осадков и сильных ветров. Мозаичность геоморфологических элементов, микроклимата и растительного покрова в пределах котловины способствует развитию широкого разнообразия геофизиологических условий (табл. 1). Для Чарской котловины в общем характерна высокая (до 500 м) мощность многолетней мерзлоты сливающегося типа с температурами ММП на глубинах подошвы активного слоя от –6 до –4°С. Непосредственно на участке «Беленький», где располагается площадка сети CALM (circumpolar active layer monitoring), глубина сезонного протаивания варьирует в пределах 0,5 – 0,9 м.^[8.17] Температура почв на уровне подошвы слоя сезонного оттаивания составляет –4°С.^[17]

Таблица 1. Ландшафтно-геофизиологические характеристики различных типов местности в равнинной части Чарской котловины (по Сергееву и др. ^[17])

Площадка	Геоморфологический элемент	Высота (абс.), м	Средняя температура (2006–2014 гг.), °С		
			Воздуха	Поверхности почвы	На глубине подошвы СТС
«Мост»	Заболоченная высокая пойма р. Чары	700	–6,9	–3,4	–5,0
«Беленький»	Надпойменная терраса р. Чары	728	–6,6	–2,5	–4,0
«Пески»	Массив развеваемых песков	753	–	–1,9	+0,3

Территория Чарской котловины относится к горно-таёжному высотно-ландшафтному поясу. Низменности здесь представлены редколесьями лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*) с подлеском из берёзы растопыренной (*Betula divaricata*) и кедровым стлаником (*Pinus pumila*), а также широко распространён мощный мохово-лишайниковый покров. При подъёме в горы лиственничные редколесья постепенно уступают место зарослям кустарников с фрагментарным мохово-лишайниковым покровом, а вершины горных хребтов часто вообще не имеют растительного покрова – гольцы. В межгорных котловинах Байкальского типа, распространённых в этом секторе криолитозоны России, часто наблюдается следующие высотные спектры почвенно-ландшафтных комбинаций (табл. 2). Наиболее подробно почвенно-ландшафтные связи в структуре высотной поясности внутренних склонов межгорных котловин байкальского типа рассмотрены в диссертации Н.А. Ногиной^[13], подытожившей результаты 50 лет почвенных исследований в этом районе.

Более подробная и полная физико-географическая характеристика района исследований представлена в статье Ю.К.Васильчука и др.^[4].

Таблица 2. Почвенно-ландшафтные комбинации, характерные для основных высотно-ландшафтных поясов межгорных котловин байкальского типа (по Н.А. Ногиной [13])

Высотно-ландшафтный пояс	Высота (абс.), м	Группы растительных сообществ	Почвы
Сухостепной	< 800	Сухостепные, лугово-сухостепные	Каштановые (в т.ч. луговато-каштановые), солонцы, солончаки соровые
Разнотравно-злаковый	800-1000	Лугово-степные, настоящие степи, пышные луга, сухостепные	Чернозёмы мучнисто-карбонатные, мало- и бескарбонатные, лугово-чернозёмные, луговые и мерзлотно-луговые, солончаки луговые, солончаковатые
Горнолесной	1000-1200	Смешанные горнолесные	Подзолистые, горные мерзлотно-дерново-таёжные
Горнотаёжный	1200-1400	Северо- (верхне-) таёжные, среднетаёжные, южнотаёжные	Горные (в т.ч. дерновые) мерзлотно-таёжные, мерзлотно-таёжные (в т.ч. оподзоленные), подзолы иллювиально-железистые, подзолистые, мерзлотно-болотные
Гольцовый	> 1400	Горно-тундровые, горно-луговые	Гольцово-пустошные, горно-тундровые, горно-луговые (субальпийские)

1.3. Полевые методы работ

Почвенно-геохимические исследования на ключевом участке «Беленький» проведены в июле 2022 г. Сезонно-талый слой почв опробован с помощью пластиковых ножей. Масса каждого образца из генетических горизонтов почв составила 250 – 500 г. Многолетнемёрзлые породы были опробованы с помощью электрического бура.

1.4. Лабораторные методы работ

Кислотность водной вытяжки (рН) из почв и содержание в ней легкорастворимых солей (TDS, мг/л) были определены с помощью лабораторных стационарных потенциометра (водород-селективного электрода) и кондуктометра METTLER-TOLEDO потенциометрическим и кондуктометрическим методами, соответственно. Электропроводность почвенной вытяжки (ЕС, мкС/см) вычислялась как удвоенное содержание легкорастворимых солей ($ЕС = TDS \cdot 2$).

Общее содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почвах было измерено методом И.В. Тюрина с фотометрическим окончанием в результате окислительно-восстановительного титрования бихроматно-калиевой вытяжки из почвы солью Мора в присутствии 5-6 капель фенилантраниловой кислоты.

Гранулометрический состав почв был определён методом лазерной гранулометрии на гранулометре Fritsch Analysette-22 (Германия) при предварительной обработке почвы пирофосфатом натрия и ультразвуковой дезинтеграции коллоидных частиц.

Групповой состав железа, включающий несиликатные, оксалаторастворимые и связанные с органическим веществом группы соединений, был изучен при параллельном

экстрагирования по схеме С.В. Зонна: несиликатное железо ($Fe_{нс}$) вытесняется из почвенной вытяжки в растворе солей натрия при добавлении сухого порошка дитионита натрия по методу Мера-Джексона, оксалоторастворимое ($Fe_{окс}$) – реактивом Тамма с pH 3,8 по методу Тамма, экстрагируемое или связанное с органическим веществом ($Fe_{экстр}$) – пиррофосфатом калия по методу Баскомба. Подробно методика описана в [19], у Ю.Н. Водяницкого и Н.П. Кирилловой [6].

1.5. Коэффициент радиальной дифференциации

Для анализа радиальной дифференциации почвенных профилей был использован коэффициент радиальной дифференциации R. [15] Он вычисляется по формуле $R_i = C_{i_{гор}}/C_{i_{пор}}$, где $C_{i_{гор}}$ – содержание химического элемента i в горизонте почвы, $C_{i_{пор}}$ – содержание в породе, где влияние почвообразовательных процессов на химический состав условно пренебрежимо.

2. Результаты

2.1. Криогенные почвы и их физико-химические свойства

Представленные на террасе р. Чары профили почв имеют ряд диагностических признаков, позволяющих отнести их к стволу постлитогенного почвообразования, отделу глеевых почв, типу глеезёмов, а также присвоить их названиям подтипы постпирогенный и мерзлотный. Мощности сезонно-талого слоя этих почв составляют 34 (разрез Ch-22-1 – правый берег руч. Беленького, заболоченная поверхность) и 44 (разрез Ch-22-2 – левый берег руч. Беленького, поверхность без признаков заболачивания) см, соответственно. Верхние части обоих рассмотренных профилей характеризуются тёмно-бурыми, слабо- и среднеразложёнными горизонтами подстилок, в которых при близком рассмотрении наблюдаются мелкие (менее 0,5 см) и крупные (до 2 см) угольков, а также остатков обуглившихся фрагментов осоки, – признаки пирогенного процесса, который резко- и экстраконтинентальных областях Сибири в той или иной степени затрагивает весь почвенный покров, из-за чего А.П. Чевычелов ввёл постпирогенный подтип в классификацию постлитогенных почв на минеральном субстрате. [20] Ниже в профилях почв происходит смена органогенного горизонта на минеральный глеевый (G), который отличается контрастом окислительно-восстановительных условий, диагностируемым по ярко-рыжему или светло-серо-бурому с желтизной цветам, свидетельствующим о преобладании трёхвалентной формы железа над двухвалентной. По-видимому, проникающий сквозь горизонты O воздух создаёт здесь окислительную обстановку, но глубокие горизонты (CG) из-за большей влажности и утяжелённого гранулометрического состава не пропускают воздух, в результате чего содержание преобладающей формы Fe^{2+} повышается. Многолетнемёрзлые горизонты почв, верхние границы которых находятся на глубинах 34 и 44 см от поверхности, соответственно, практически аналогичны по цвету и гранулометрическому составу вышележащим. Они отличаются массивной криогенной текстурой с низким общим содержанием льда ($\leq 30\%$).

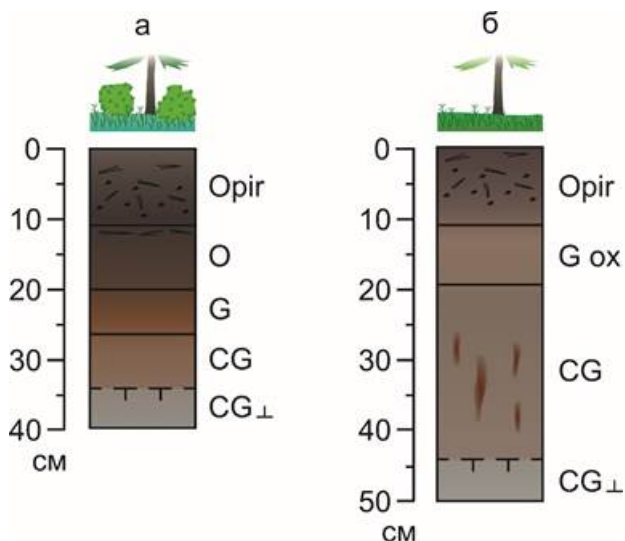


Рис. 2. Профильное строение почв долины р. Чары: глеезём постпирогенный мерзлотный (Ch-22-1) (а), глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный (Ch-22-2) (б)

Согласно классификации и диагностике почв России [9], изученным почвам были даны названия: глеезём постпирогенный мерзлотный (рис. 2а) и глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный (рис. 2б).

Глеезёмы долины Чары относятся к кислым почвам с рН от 3,9 до 5,1 единицы. Для величин рН характерны наиболее низкие значения в верхней части профиля и дальнейшее возрастание с глубиной. В среднем, профиль глеезёма Ch-22-1 более кислый (3,9–4,5), чем профиль Ch-22-2 (4,9–5,1).

Содержание органического углерода в почвах максимально достигает 8,7% в органогенном горизонте разреза глеезёма постпирогенного мерзлотного (Ch-22-1) и 6,8% в разрезе глеезёма окисленно-глеевого постпирогенного мерзлотного (Ch-22-2). Ниже по профилю количество $C_{орг}$ в горизонтах почв снижается в 4,5–5,5 раз, причём в горизонтах ММП (CG_{\perp}) в обоих случаях встречается небольшая аккумуляция $C_{орг}$ в сравнении с вышележащими немёрзлыми горизонтами.

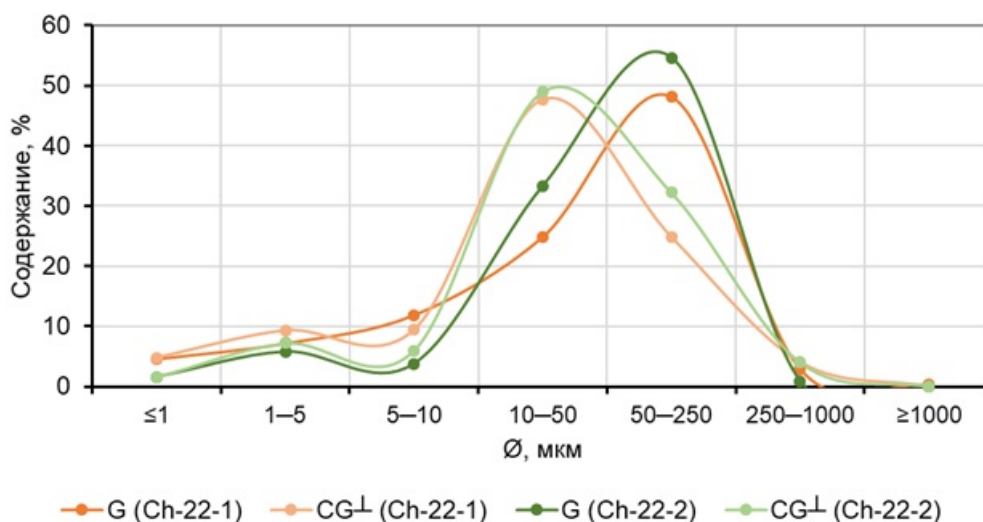


Рис. 3. Содержания гранулометрических фракций определённого диаметра (мкм) в талых (G) и многолетнемёрзлых (CG_{\perp}) горизонтах глеезёмов долины р. Чары, %

По содержанию физической глины изученные профили глеезёмов были отнесены к

легкосуглинистым (содержание частиц физической глины в профиле глееёма постпирогенного мерзлотного – 23,5–23,7%) и супесчаным (в профиле глееёма окисленно-глеевого постпирогенного мерзлотного – 11,2–14,8%), по классификации Н.А. Качинского. На рис. 3 видно, что многолетнемёрзлые горизонты в среднем обладают чуть более тяжёлым гранулометрическим составом, чем сезонно-талые. Преобладающей фракцией в них является 10-50 мкм, тогда как в сезонно-талых минеральных горизонтах наиболее концентрированной является фракция 50-250 мкм.

2.2. Валовой элементный состав почв

Спецификой элементного состава криогенных почв долины р. Чары являются примерно сопоставимые содержания Fe и Mg в них около 2–4%, а также пониженные концентрации Ti и Mn – их содержания в профилях почв всегда ниже 1% (рис. 4). Кроме того, среди микроэлементов наибольшими среди изученных концентрациями отличаются Sr и Zr, содержания которых достигают 29,7 и 47,1 мг/кг, соответственно.

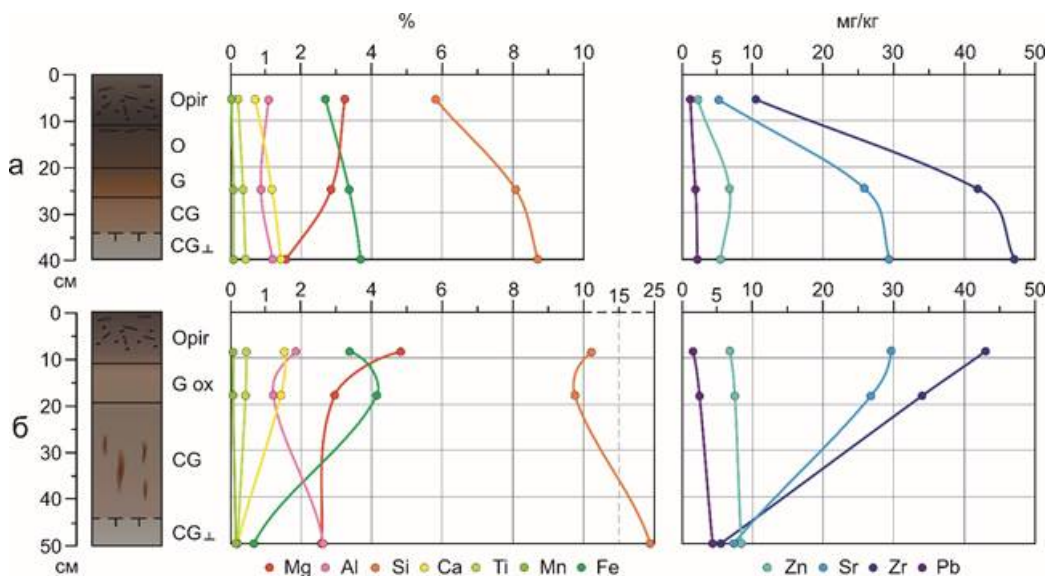


Рис. 4. Профильные распределения содержаний химических элементов в профилях глееёмов долины р. Чары: глееём постпирогенный мерзлотный (Ch-22-1) (а), глееём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный (Ch-22-2) (б)

Содержания Si в рассмотренных глееёмах значительно различаются, их концентрации от 5,8 до 8,7% и от 8,1 до 24,3%. Наблюдается увеличение концентраций Si к нижней части профилей обеих почв. Ни один другой макроэлемент не характеризуется похожей тенденцией в профильном распределении, к примеру, обладающие аналогичными геохимическими свойствами Al и Fe накоплены, в основном, в верхних частях профилей – в поверхностном органогенном горизонте. Ниже по профилю их содержание, а также содержания Mg и Ca, снижаются иногда в 2–8 раз. Ti и Mn, концентрации которых в изученных почвах малы, характеризуются также незначительным варьированием в пределах профиля – от 0,2 до 0,4% (Ti) и от 0,03 до 0,1% (Mn).

Sr и Zr демонстрируют различные профильные распределения в двух почвах: если в профиле Ch-22-1 они аккумулируются в глубинных горизонтах, в том числе, многолетнемёрзлых (рис. 4а), то в профиле Ch-22-2 всё происходит с точностью до наоборот. Zn и Pb в профиле распределены весьма равномерно, при этом концентрации свинца наименьшие среди рассмотренных микроэлементов – от 1 до 4,5 мг/кг.

2.3. Радиальная дифференциация химического состава почв

В случае принятия горизонтов ММП за горизонты почвообразующих пород, наблюдается обогащение органоминеральных горизонтов Mg ($R = 2,1$) в профиле Ch-22-1 (рис. 5а) и Mg, Ca, Ti, Fe, Sr и Zr в профиле Ch-22-2 (рис. 5б). Выносом из верхних частей обеих почвенных профилей характеризуются Al, Si, Mn и Pb. Коэффициенты R этих элементов в надмерзлотной части почв варьируют от 0,3 до 0,9. Контрастность профильных распределений элементов в почвах различается следующим образом: Если контрастным профильным распределением в профиле Ch-22-1 отличается только Mg, то в профиле Ch-22-2 контрастно в пределах профиля распределена большая часть элементов – Mg, Ca, Ti, Fe, Sr и Zr, обогащение профилей почв которыми двукратно и более (к примеру, $R_{Ca} = 9,8$).

Горизонты многолетнемерзлых пород, по сравнению с вышележащими тальми горизонтами, обогащены большей частью элементов, кроме Mg. Вероятно, в результате прошедшего около 3 лет назад пожара произошла мобилизация этих элементов и их вынос в нижнюю часть профиля почвы, а процессы самовосстановления почв ещё не достигли той стадии, после которой достигается изначальное содержание элементов.

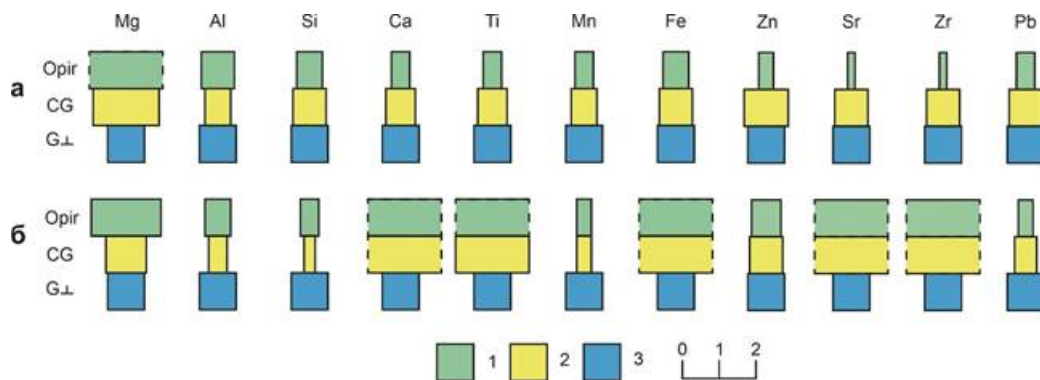


Рис. 5. Коэффициенты радиальной дифференциации (R) химических элементов в криогенных почвах долины р. Чары: сезонно-талые горизонты (1), криогенные сезонно-талые горизонты (2) и многолетнемерзлые горизонты (3)

В профиле глееёма окисленно-глеевого постпирогенного мерзлотного, поверхность которого была пройдена пожаром 28–30 лет назад, наоборот, по-видимому, наблюдается та стадия постпирогенного восстановления почвы, на которой концентрации большей части химических элементов достигают временного максимума, после которого они вновь вовлекаются в циклы радиальной миграции и формирование радиальных распределений начнётся вновь.

2.4. Групповой состав соединений железа

Анализ группового состава соединений железа показал, что силикатные соединения железа (Fe_C) являются преобладающими в структуре валового содержания Fe, его доля варьирует от 0,6 до 0,75 от всего содержащегося в почвенных горизонтах железа. Доля несиликатных соединений (Fe_{HC}) значительно ниже силикатных, их абсолютное содержание находится в пределах от 0,3 до 0,59% (табл. 3), причём значительного снижения или очевидной дифференциации между тальми и мерзлыми горизонтами почв не наблюдается. Для глееёма постпирогенного мерзлотного (разрез Ch-22-1) характерно практически равнозначное содержание $Fe_{окс}$ и $Fe_{экстр}$, причём как между этими фракциями, так и между горизонтами почв – 0,07–0,08, а для разреза Ch-22-2, напротив, характерно преобладание оксалорастворимого железа над экстрагируемым почти в 2 раза, а также в обоих случаях почти двукратное увеличение содержаний этих

соединений при переходе от горизонтов СТС к ММП (табл. 3).

Вероятно, заболачивание той части поверхности надпойменной террасы и преобладание восстановительных условий в профиле глееёма в разрезе Ch-22-1, о чём также свидетельствуют морфологические свойства профиля этой почвы, привело к выравниванию содержаний $Fe_{окс}$ и $Fe_{экстр}$ по глубине.

Таблица 3. Валовое содержание железа ($Fe_{вал}$), а также концентрации его силикатных (Fe_C), несиликатных ($Fe_{нс}$), оксалорастворимых ($Fe_{окс}$) и экстрагируемых ($Fe_{экстр}$) соединений (%) в глееёмах долины р. Чары

Образец	Горизонт	Глубина, см	Содержание соединений железа, %				
			$Fe_{вал}$	Fe_C	$Fe_{нс}$	$Fe_{окс}$	$Fe_{экстр}$
Разрез Ch-22-1. Глееём постпирогенный мерзлотный							
Ch-22-1/2	G	20(25)-26(30)	3,36	3,06	0,30	0,08	0,08
Ch-22-1/3	CG \perp	34...	3,67	3,25	0,41	0,08	0,07
Разрез Ch-22-2. Глееём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный							
Ch-22-2/2	G _{ох}	11(13)-18(25)	4,14	3,55	0,59	0,13	0,06
Ch-22-2/3	CG \perp	44...	0,62	0,29	0,33	0,32	0,12

3. Дискуссия

Наибольшими концентрациями в изученных нами почвах характеризуются Si, Fe и Mg, их средние содержания равны 11,1, 3,0 и 3,0%, соответственно. Наиболее контрастно распределены в профилях почв именно эти элементы, значения $R_{Mg, Si, Fe} = 1.8-2.1, 0.3-0.9$ и $0.7-6.7$, соответственно. Наиболее существенно из пирогенных горизонтов почв Прибайкалья под хвойными лесами в дельте р. Селенги по данным А.Б.Гыниновой выносятся Si (70% против 73,1–75%), Al (12,8% против 13,3–13,7%) и K (2,9% против 3,1–3,3%), а накапливаются Mn (0,1% против 0,04–0,1%) и Ca (1,9% против 1,7%). Также весьма контрастно профильное распределение Ca, R-коэффициент которого в исследованных горизонтах почв составляет от 0,5 до 9,8. Верхняя часть профиля почвы Ch-S-22-1 обеднена Ca, Ti и Fe ($R = 0,5 - 0,9$), а в почве Ch-22-2 верхняя часть профиля, напротив, обогащена этими макроэлементами ($R = 2,0 - 9,8$).

Микроэлементы, за исключением Rb, Sr и Zr, отличаются сходными тенденциями профильных распределений в обоих профилях почв. Верхние части профилей почв Ch-22-1 и Ch-22-2 обеднены Zn, Y, Nb и Pb, причем недавно выгоревший горизонт O обеднен ими сильнее, чем пройденный пожаром 28 лет назад O_{pir}. Если Rb распределен в профиле почвы Ch-22-1 относительно слабоконтрастно ($R = 0,8$), то Sr и Zr, напротив, очень слабо закрепляются в верхней части профиля этой почвы, особенно в поверхностном органогенном горизонте O ($R = 0,2$). Во втором профиле, напротив, значения коэффициента R показывают сильное накопление Rb, Sr и Zr в верхней его части. Здесь они имеют значения 3,1 (Rb), 3,6–4,0 (Sr) и 6,1–7,7 (Zr). С.Б. Сосоровой с соавторами [18] было установлено, что под воздействием низовых лесных пожаров незначительно увеличиваются валовые содержания и концентрации подвижных форм Zn,

Cu, Pb в слое почв глубиной от 0 до 40 см, а также содержания Zn и Pb в организмах растений на горячих. Среди изученных элементов степень интенсивности захвата и накопления распределяется таким образом: Pb, Cr – средний захват, Cd, Co, Ni – среднее накопление, Zn, Cu – среднее и интенсивное накопление. Здесь полученные нами результаты вступают в противоречие с данными работы Сосоровой и др. [18], поскольку в ней продемонстрирован вынос Zn и Pb из пирогенных горизонтов с разной степенью активности ($R_{Zn} = 0,4-0,8$ и $R_{Pb} = 0,5-0,4$). Ю.Н. Краснощекковым [10] также было отмечено, что постпирогенные прослои и горизонты таких профилей значительно отличаются от природных негоревших аналогов по элементному составу, зольности органического вещества. Подстилочные горизонты песчаных почв в сосновых лесах этого региона в целом характеризуются высокими концентрациями микроэлементов и слабым их выносом. Наиболее интенсивно в подстилке концентрируются Zn и Cd, а Pb, Cu, Co и Ni накапливаются слабее. Среди изученных элементов повышение концентраций Zn, Co, Cd и Pb отмечается в постпирогенных горизонтах почв, а для Cu и Ni характерно снижение концентраций после прохождения пожара. Тем не менее, автор отмечает, что помимо пожаров на элементный состав может влиять не только пожар, но и, в не меньшей степени, геохимическая обстановка территории – в частности, скорость водной миграции и биологического поглощения.

Относительно низкие содержания несиликатного железа в профилях изученных почв свидетельствуют, во-первых, о преимущественно лёгком (песчаном и супесчаном) гранулометрическом составе почвенных горизонтов, в основном сложенных аллювиальным материалом с преобладанием алюмосиликатов железа, во-вторых, о том, что характерное время почвообразования для данного признака было многократно превышено. Относительно высокие (до 0,32%) концентрации Fe_{окс} свидетельствуют о том, что в горизонтах ММП почв замедлены процессы преобразования форм железа. Близкие результаты были получены в некоторых более ранних исследованиях авторов в различных районах криолитозоны Якутии [2] и Большеземельской тундры [3]. К тому же, гидроморфизм почв, возникающий в результате близкого к поверхности залегания ММП, определяет относительно высокие (до 0,08%) содержания Fe_{окс} в горизонтах почв на заболоченном участке террасы Чары. К похожим выводам о влиянии гидроморфизма почв на групповой состав железа пришли Ю.Н. Водяницкий с соавторами [5].

4. Заключение

Коэффициенты радиальной дифференциации (R), предназначенные для оценки неоднородности профильных распределений содержаний химических элементов в почвах, редко применяются в исследовании криогенных почв в мерзлотных ландшафтах криолитозоны. Авторами изучены содержания и профильные распределения макро- и микроэлементов в глеезёмах постпирогенных мерзлотных в долине р. Чары в днище Чарской котловины. С помощью стандартных лабораторных методик были исследованы pH, ЕС, содержание C_{орг} и гранулометрический состав изученных почв. Валовые содержания химических элементов измерены методом РФА.

Установлены следующие интервалы содержаний элементов в изученных почвах: Mg (1,6–4,8%), Al (0,9–2,6%), Si (5,8–24,3%), Ca (0,2–1,5%), Ti (0,2–0,4%), Mn (0,03–0,1%), Fe (0,6–4,1%) Zn (8,5–2,0 мг/кг), Sr (5,0–29,7 мг/кг), Zr (5,6–47,1 мг/кг) и Pb (1,0–4,5 мг/кг). Профильные распределения Si характеризуются увеличением его концентраций с глубиной почвы. Fe, Al, Ca и другие элементы отличаются аккумуляцией в поверхностных органогенных горизонтах почв. Такие элементы, как Ti, Mn и Pb практически не

варьируют в профилях почв. Вынос большей части химических элементов, кроме Mn (R_{Mn} достигает 2,1), предположительно, связан с тем, что около 3 лет назад поверхность почвы была пройдена природным пожаром, из-за чего произошла мобилизация большей части содержащихся в подстилках элементов, а процесс самовосстановления почв ещё не достиг той стадии, после которой характерные концентрации возвращаются в исходное состояние. Напротив, в верхней части профиля глеезёма окисленно-глеевого постпирогенного мерзлотного как раз наблюдаются максимумы концентраций некоторых элементов, значения R которых превышают 2,0 и более, что свидетельствует об активной стадии постпирогенного восстановления свойств почвы, пройденной пожаром около 30 лет назад.

По групповому составу соединений железа изученные почвы близки к многим тундровым и таёжным, в том числе, в пределах сплошной и островной криолитозоны. Отмечается более монотонное профильное распределение оксалаторастворимых и экстрагируемых соединений железа в почве с повышенной влажностью и преобладанием восстановительных условий среды.

Благодарности: Авторы выражают благодарность к.г.-м.н., зав. лаб. геокриологии Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН Д.О. Сергееву и м.н.с. ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» В.А. Паламарчук за помощь в проведении полевых работ, а также д.б.н., профессору географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова М.И. Герасимовой за помощь и консультации по правилам классификации и диагностике почв, с.н.с., к.г.н. Н.А. Буданцевой и м.н.с. Дж.Ю. Васильчук за обсуждение результатов.

Библиография

1. Алексеев А.И., Абакумов Е.В. Тяжёлые металлы в почвах природных и урбанизированных ландшафтов Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа, 2019. С. 89–92. DOI 10.26110/ARCTIC.2019.102.1.012
2. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилюй, Центральная Якутия // Арктика и Антарктика, 2023а. №1. С. 65–84. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40034
3. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. Латеральная и радиальная дифференциация геохимического состава криогенных почв учебно-научного полигона Хановой, Большеземельская тундра // Арктика и Антарктика, 2023б. №1. С. 88–114. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40136
4. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю. Криогенные почвы в долине р. Чары, Забайкалье // Арктика и Антарктика, 2022. №3. С. 54–91. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.3.38689>
5. Водяницкий Ю.Н. Соединения железа и их роль в охране почв. – М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2010. 156 с.
6. Водяницкий Ю.Н., Кириллова Н.П. Использование системы CIE-L*a*b* для характеристики цвета почв // Почвоведение, 2016. №11. С. 1337–1346. DOI: 10.7868/S0032180X16110101
7. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Серия Бодайбинская. Лист О-50-XXIX / Автор В.С. Шульгина. Ред. А.М. Лейтес / Всесоюзное аэрогеологическое научно-производственное объединение "Аэрогеология" Министерства геологии СССР, 1975.
8. Заболотник С.И., Климовский И.В. Сезонное протаивание и промерзание грунтов в

- Чарской котловине // Геокриологические условия Забайкальского севера. М.: Наука, 1966. С. 162–171.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 10. Краснощеков Ю.Н. Постпирогенная трансформация почв сосновых лесов в юго-западном Прибайкалье // Вестник КрасГАУ, 2009. №9. С. 60–65.
 11. Криология почв. – М.: РАН, 2019. – 464 с.: ил.
 12. Методы изучения последствий изменения климата для природных систем: Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота / Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Павлов А.В., Романовский В.Е., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. // Изд-во ВНИИГМИ, 2012. С. 301–359.
 13. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М: Наука, 1964. 288 с.
 14. Основы биогеохимии: Учеб. пособие для геогр., биол., геолог., с.-х. спец вузов. – М.: Высш. шк., 1998. – 413 с.: ил.
 15. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта: Учебник. М.: Астрейя, 1999. 764 с.
 16. Природные условия освоения севера Читинской области. М.: Издательство АН СССР, 1962. №М-117В. 124 с.
 17. Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Перельштейн Г.З., Романовский В.Е., Безделова А.П., Алексютина Д.М., Болотюк М.М., Хименков А.Н., Карпалова В.Н., Мотенко Р.Г., Малеева А.Н. Фоновый геокриологический мониторинг в северном Забайкалье // Криосфера Земли, 2016. Т. XX. №3. С. 24–32.
 18. Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л. Пирогенное изменение содержания микроэлементов в почвах и растениях сосновых лесов Западного Забайкалья // Сибирский экологический журнал, 2013. №5. С. 661–674.
 19. Теория и практика химического анализа почв / ред. Л.А. Воробьева. – М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
 20. Чевычелов А.П. Пирогенез и постпирогенные трансформации свойств и состава мерзлотных почв // Сибирский экологический журнал, 2002. №3. С. 273–278.

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, закономерности радиальной дифференциации химического состава криогенных почв на примере долины реки Чары, Северное Забайкалье.

Методология исследования, в статье указаны о использовании полевых методов, определение кислотной вытяжки РН, химический анализ легкорастворимых солей, содержание органического углерода, групповой состав железа и другие полученные в результате применения лабораторных работ химического анализа макроэлементного состав в мерзлых породах, а также анализ литературных данных. Судя по иллюстративным материалу автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о профильных распределениях химических элементов в почвах криолитозоны – весьма перспективное направление современной геохимии ландшафтов так как изучение радиальной водной миграции элементов и соединений в мерзлотных почвах может быть

полезным с точки зрения их участия в биогеохимических циклах, которые не до конца исследованы в северных экосистемах, во-вторых, исследование загрязнённых почв актуально в связи с хозяйственным освоением Арктической зоны России, где сосредоточены многочисленные промышленные производства, в-третьих, всестороннее изучение процессов почвенного криогенеза, в том числе его роли в формировании профильных распределений отдельных элементов (например, железа), на данном этапе развития криопедологии входит в число важнейших её задач для теории криолитогенеза.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделать вывод об содержании и профильном распределении макро- и микроэлементов в глеезёмах постпирогенных мерзлотных в долине р. Чары в днище Чарской котловины, исследованы рН, ЕС, содержание Сорг и гранулометрический состав изученных почв, валовые содержания химических элементов. Это является важным дополнением в развитии геокриологии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс образования льда в почве.

Из приведённых автором направлений следует отметить особенно интересный момент по групповому составу соединений железа изученные почвы близки к многим тундровым и таёжным, в том числе, в пределах сплошной и островной криолитозоны.

Статья содержит разнообразный интересный иллюстративный материал в форме таблиц рисунков диаграмм.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по геохимическому анализу особенности 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.