

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. — Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилюй, Центральная Якутия // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40034 EDN: PNASYH URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40034

Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилюй, Центральная Якутия

Васильчук Юрий Кириллович

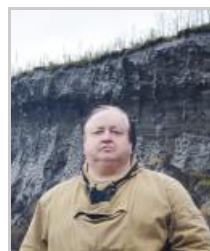
ORCID: 0000-0001-5847-5568

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, Ленинские горы область, г. Ленинские Горы, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.40034

EDN:

PNASYH

Дата направления статьи в редакцию:

24-03-2023

Аннотация: Предметом исследования являются почвенно-геохимические особенности криогенных среднетаёжных ландшафтов долины реки Вилюй в её среднем течении, расположенных вблизи Махатта и посёлка Кысыл-Сыр Республики Саха (Якутия). Были составлены морфологические описания почвенных профилей. 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 среднего течения Вилюя являлся валовой химический состав криогенных почв. Валовые содержания химических элементов были определены методом рентгеновской флуоресценции при помощи портативного РФА, после чего были рассчитаны геохимические коэффициенты радиальной (профильной) и латеральной (катенарной) дифференциации концентраций химических элементов – R и L. В автоморфных почвах большая часть химических элементов выносятся из поверхностных органогенных горизонтов, а в минеральных они концентрируются, причём среди всех элементов наибольшими значениями коэффициентов R отличаются такие элементы, как Ca, Ti, Mn, Fe, Zn и Zr (R достигают 20). На радиальную дифференциацию значительное влияние оказывают кислотность, содержание органического углерода и другие свойства почв, например, повышенное относительно горизонтов почвообразующих пород содержание Si, Ca, V и Zn (R до 1,3 – 3,7) связано с содержанием Сорг. В плане латеральной дифференциации большая часть из исследованных элементов характеризуется аккумуляцией в верхней части почвенно-геохимической катены. Наиболее широко распределены в почвах катены Ca, Mn, Fe, Zn и Y ($LCa = 0,3 - 1,8$; $LMn = 0,1 - 2,0$; $LFc = 0,6 - 2,1$; $LZn = 0,9 - 2,9$ и $LY = 0,3 - 1,4$).

Ключевые слова:

криогенные почвы, многолетнемерзлые породы, почвенно-геохимическая катена, концентрации макроэлементов, концентрации микроэлементов, латеральная дифференциация, радиальная дифференциация, средняя тайга, Центральная Якутия, река Вилуй

Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова "Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды" и госбюджетной темы 1.4. «Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов», № ЦИТИС 121051400083-1.

Введение

Многолетнемерзлые породы в центральной якутской части криолитозоны являются одними из самых древних и мощных на планете: их возраст достигает нескольких сот тысяч, а может и 1-2 миллиона лет, а мощность варьирует в диапазоне от 500 до 1 500 м. [\[7,8,12\]](#) Современные климатические изменения способствуют динамике многолетнемерзлых пород [\[11,15,29\]](#), неравномерность которой в пространстве и времени создаёт многообразие криогенных ландшафтных обстановок в этом регионе. [\[19\]](#) Одним из последствий увеличения мощности сезонно-талого слоя (СТС) современных почв криолитозоны является вовлечение в малый биологический круговорот биологический круговорот (МБК) [\[25\]](#) химических веществ, ранее не задействованных в нём по причине многолетнемерзлого состояния содержащих их пород. Химические вещества, высвобождающиеся из мерзлых горизонтов почв, интересны для изучения не только по причине изменений биогеохимических циклов, но и с точки зрения собственно влияния криогенеза на химический состав и геохимические свойства криогенных почв. Район Центральной Якутии в среднем течении реки Вилуй является одним из уникальных по сочетанию развитых здесь криогенных процессов – морозобойного растрескивания, термосуффозии, термокарста, термоэрозии, солифлюкции, морозной сортировки, наледообразования и т.п. [\[12\]](#), поэтому данные о криогенном факторе формирования и

динамики геохимических свойств местных почв весьма интересны.

2. Объекты и методы

2.1. Физико-географические условия района исследования

Географическое положение

Район исследования расположен в долине реки Вилюй (Центральная Якутская равнина) в среднем её течении (63°54'10.92" с.ш., 122°33'17.87" в.д.; высота над уровнем моря около 100 м). В 10,5 км к востоку от него находится посёлок Кысыл-Сыр Вилюйского района. От г. Якутска район исследования удалён на 410 км к северо-востоку.

Краткая физико-географическая характеристика района исследования

Центральная Якутская равнина расположена в Вилюйской синеклизе – надпорядком элементе Сибирской платформы.^[31] Геологический фундамент территории образован осадочными отложениями мелового возраста (К 2 – верхнего отдела меловой системы), мощность которых здесь достигает 150–200 м.^[9] Берега Вилюя в его среднем течении сложена разновозрастным аллювием (от 39 до 12 тысяч лет). Низкие поймы – песчаным материалом с редкой горизонтальной слоистостью, высокие поймы и террасы чаще супесчаные с включениями галечников.^[33] На правом берегу Вилюя наблюдается комплекс из 5 надпойменных террас, имеющих резкие эрозионные уступы, левый берег насчитывает только до 3 таких террас, а ширина пойм на нём в 2–3 раза меньше, чем на правом.^[9] На обоих берегах довольно характерны крупные песчаные эоловые массивы с копьевидными закреплёнными и незакреплёнными дюнами – тукуланы.^[17] Многолетнемерзлые породы (ММП) в центральной Якутии распространены сплошно по вертикали и латерали, их вертикальная мощность достигает в среднем течении Вилюя 320 м.^[23,36] Средняя температура пород на границе слоя сезонных колебаний от -1 до -3°C, льдистость низкая – от 0,2 до 0,4%.^[24] Мощность сезонно-талого слоя (СТС) поверхностных отложений здесь весьма неравномерна и зависит в первую очередь от их состава: торфяники оттаивают всего на 0,5 м, тогда как супеси и суглинки – до 1,5 м, а СТС песков может превышать 4 м.^[2] Река Вилюй, левый и самый крупный приток реки Лены, имеет речной бассейн площадью 57,3 тыс. км², несколько крупных притоков (рр. Чона, Марха, Тюнг, Олёкма и др.) и гидрокарбонатно-кальциевый химический состав.^[4] Центральная Якутия характеризуется наличием таликов под руслами рек и котловинами озёр, известно о распространении субэкральных над- и межмерзлотных водоносных таликов на террасах крупных рек.^[18] Характерными особенностями подземных вод здесь являются их слабокислая реакция, малая минерализация (до 0,1 г/л), преимущественно гидрокарбонатный кальциево-магниевый/натриевый химический состав.^[26] Климат местности относится к резко-континентальному типу, средняя температура наиболее холодного месяца года – января, – составляет -37,8°C, наиболее тёплого – июля, – +17,9°C. Среднегодовая температура воздуха здесь держится около -9,3°C.^[20] Среднегодовое количество осадков в Центральной Якутии не превышает 250–300 мм.^[38] Из-за этого снежный покров здесь в целом невысокий, достигает максимальной мощности 25–30 см в марте, после чего стремительно сходит к концу апреля.^[22] Территория по комплексу природно-ботанических признаков относится к Вилюйскому округу Центрально-Якутской среднетаёжной подпровинции подзоны среднетаёжных лесов.^[37] Растительный покров характеризуется преобладанием брусничных и

багульниковых зеленомошных лиственничных лесов с сосновыми лесами.^[10] В структуре древостоя значительно преобладает лиственница сибирская (*Larix siberica* L.) – 79,6%, также обширные площади занимает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – 8,6%.^[5] На этой территории было выделено 9 зональных, 2 азональных и 7 интразональных типов почв, отмечается, что столь высокое разнообразие почвенного покрова является действие индивидуальных почвообразовательных макропроцессов на фоне криогенеза, типичного как для Центральной Якутии, так и в целом для криолитозоны.^[32] К зональным и наиболее распространённым здесь автоморфным почвам относятся палевые и подзолы мерзлотные. По ландшафтно-геохимическим характеристикам ландшафты верхней и средней частей бассейна Лены имеют следующую формулу:

$$I a Ca, Na - HCO_3 \frac{N, P, K, J \dots}{\dots}$$

где *I* – род ландшафта с медленным водообменом и преобладанием химической денудации над механической; *a* – вид ландшафта по глинистым и суглинистым аллювиальным отложениям (не лёссовидным); *Ca*, *Na* – *HCO₃* – типоморфные элементы в ландшафте (катионы и анионы); *N*, *P*, *K*, *J* ... – дефицитные элементы в ландшафте; избыточные элементы и соединения в ландшафте не отмечаются.^[21]

Более подробно литературные данные о физико-географических условиях территории изложены в работе.^[3]

2.2. Полевые методы исследований

Полевые работы были проведены на участке в долине реки Вилюй в июле 2021 г. В процессе исследований были заложены 12 разрезов почв в различных ландшафтных условиях от плоской поверхности второй надпойменной террасы Вилюя до днищ малых эрозионных форм и термосуффозионных воронок (рис. 1).



Рис. 1. Район исследования вблизи п. Кысыл-Сыр и восточной части тукулана Махатта. Заложенные почвенные разрезы отмечены красными точками

5 разрезов из 12 составили почвенно-геохимическую катену левобережья Вилюя (рис. 2). 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 [14] и Полевом определителе почв [30]. Полевые названия почв также были даны исходя из сочетаний диагностических генетических горизонтов и признаков, указанных в Полевом определителе почв [30].

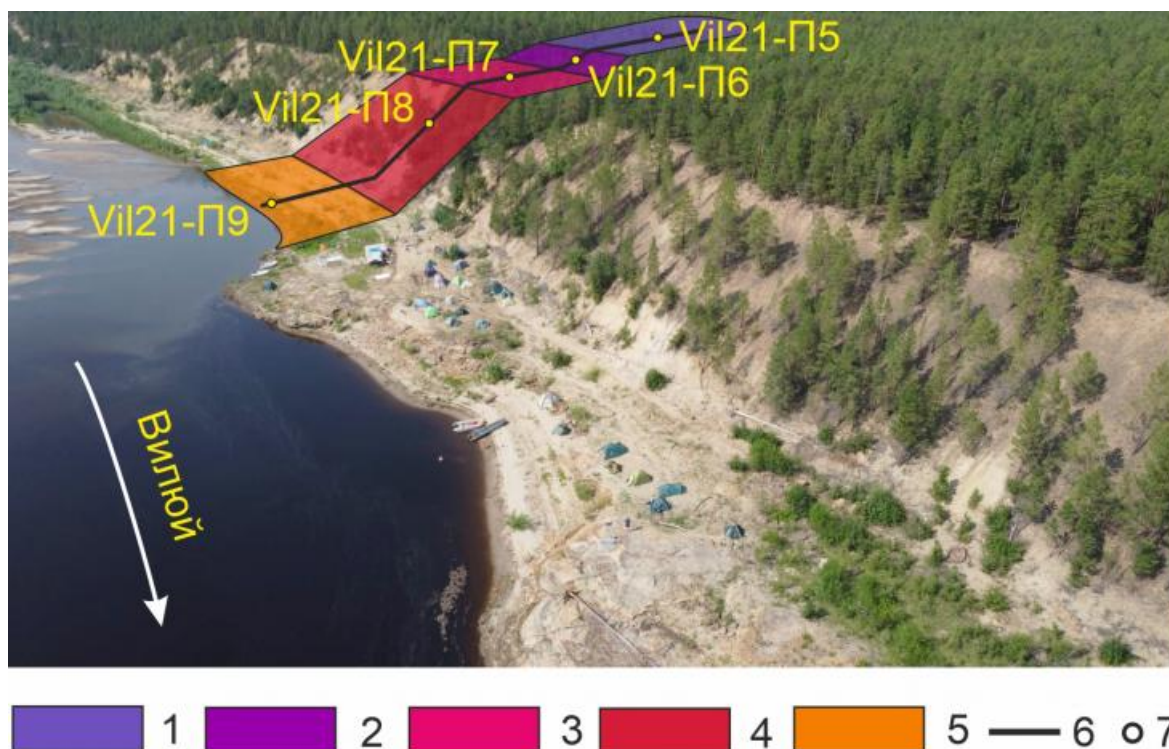


Рис. 2. Схематическое изображение почвенно-геохимической катены на левом берегу реки Вилюй: 1 – поверхность II надпойменной террасы; 2 – пологий склон II надпойменной террасы; 3 – поверхность I надпойменной террасы; 4 – крутой осыпной склон I надпойменной террасы; 5 – пойма Вилюя; 6 – линия заложения ландшафтного профиля; 7 – местоположения почвенных разрезов

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_{org}), гранулометрический состав почв (с указанием класса в соответствии с систематикой Н.А. Качинского), концентрации несиликатного (Fe_{nc}) и аморфного (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 перетирается 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 ($FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$) 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:

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

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 $\frac{1}{4} C$ (г/моль); 100 – коэффициент перевода на 100 г почвы; m – масса сухой навески почвы.

Гранулометрический состав

Образец почвы для гранулометрического анализа перетирается 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 классифицирования почв по содержанию фракции физической глины в них использовалась шкала Н.А. Качинского (табл. 1).

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

Класс гранулометрического	Содержание физической глины,
------------------------------	---------------------------------

состава	%
<i>Песчаные</i>	
Рыхло-песчаный	0 – 5
Связно-песчаный	5 – 10
Супесчаный	10 – 20
<i>Суглинистые</i>	
Легкосуглинистый	20 – 30
Среднесуглинистый	30 – 40
Тяжелосуглинистый	40 – 50
<i>Глинистые</i>	
Легкоглинистый	50 – 65
Среднеглинистый	65 – 80
Тяжелоглинистый	>80

Концентрации несиликатного и аморфного железа

Определение несиликатных соединений железа ($Fe_{нс}$) выполнялось по методу Мера-Джексона. Навеску воздушно-сухой почвы, просеянной через сито с диаметром отверстий 1 мм, массой 2 г помещали в центрифужную пробирку вместимостью 50 см³. В пробирку приливали 20 мл 0,3М раствора цитратанатрия ($Na_3C_6H_5O_7$) и 2,5 мл 1М раствора гидрокарбоната натрия ($NaHCO_3$), затем в пробирку вносили 0,5 г сухого порошка дитионита натрия ($Na_2S_2O_4$) и перемешивали стеклянной палочкой. После этого в пробирку добавляли 5 мл насыщенного раствора хлорида натрия ($NaCl$), перемешивали и оставляли в водяной бане до образования хлопьевидного осадка. Затем проводили центрифугирование в течение 10 мин при 3000 оборотах в минуту, центрифугат сливали через сухой плотный фильтр в мерную колбу вместимостью 250 мл. Концентрация железа в полученном растворе определялась методом спектрофотометрии.

Экстракция аморфных соединений железа (Fe_a) из почв была выполнена методом Ф. Тамма, основанном на экстракции окристаллизованного железа с помощью буферного раствора Тамма (0,14М по $H_2C_2O_4$ и 0,2М по $(NH_4)_2C_2O_4$). 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 объемом 250 мл и разлит по пластиковым пробиркам. Анализ концентраций аморфных форм железа был проведен методом спектрофотометрии.

Валовые содержания макро- и микроэлементов

Концентрации макро- и микроэлементов были измерены в перетёртых в агатовой ступке и просеянных сквозь сито 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 работой А.И. Перельмана и Н.С. Касимова [28]. Для характеристики элементарных геохимических ландшафтов им были даны названия в соответствии с классификацией

М.Д. Богдановой с соавторами^[11]. 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.^[27,28] Коэффициент радиальной дифференциации (R) 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) 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. Классификация, диагностика и свойства почв

Изученные почвы, согласно принятым в классификации и диагностике почв России^[14] таксономическим уровням, относятся к стволам син- (аллювиальная серогумусовая) и постлитогенного почвообразования (остальные почвы). Скорости аккумуляции речных наносов в аллювиальных почвах сопоставимы с темпами почвообразования, что приводит к циклическому характеру почвообразования в них. Почвы постлитогенного ствола относятся к следующим типам: дерново-подзолы и дерново-подбуры (почвы, развивающиеся на возвышенных участках рельефа – надпойменных террасах и их склонах), торфяно-глеозёмы (во влажных днищах малых эрозионных форм рельефа – оврагов и балок), серогумусовые, в том числе, погребённые под золовыми наносами на тукуланах, а также стратозёмы на речных поймах и псаммозёмы – на заболоченных и обводнённых участках внутри термосуффозионных воронок. Более подробно результаты классификации и диагностики почв, а также описания морфологии почвенных профилей изложены в нашей работе.^[3]

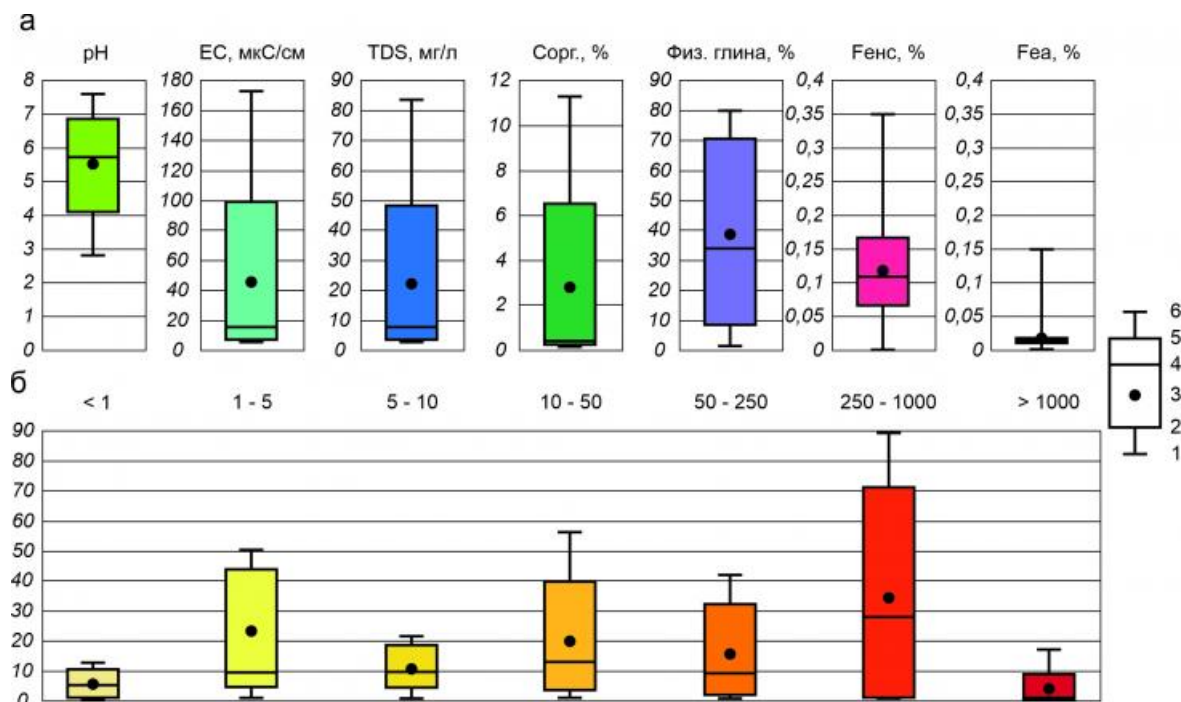


Рис. 3. Диаграммы «ящик с усами», демонстрирующие статистические показатели свойств почв (а) и содержания гранулометрических фракций (б): 1 – минимальные значения; 2 – квартиль 25%; 3 – средние арифметические; 4 – квартиль 50%; 5 – квартиль 75%; 6 – максимальные значения

Кислотность почв варьирует в изученных профилях от 2,8 до 7,6 единиц, что соответствует грациям от сильнокислых до близких к нейтральным. В основном, кислотность регулируется содержанием органического вещества, как источника легкоразлагаемых органических веществ, являющихся источником свободных ионов водорода при деструкции. Более кислыми реакциями отличаются поверхностные органогенные (Т, О и АУ) горизонты, а также погребённые торфяные горизонты ([О] и др.). Притом, если pH серогумусовых горизонтов АУ незначительно отличаются от нижележащих горизонтов преимущественно минерального фазового состава (Е, ВF и т.п.) – примерно на 0,5–1,0 единиц, то торфяные горизонты являются самыми кислыми (pH понижается до 2,8). В целом, для почв характерен элювиально-иллювиальный тип профильного распределения. Среднее значение pH равно 5,7, а разброс стандартных отклонений составляет $\pm 0,9$ с коэффициентом вариации 0,2 (табл. 2, 3).

Таблица 2. Физико-химические свойства почв долины реки Вилюй

Почва	Горизонт	Глубина, см	pH	ЕС, мкС/см	TDS, мг/л	C _{орг} , %	Содержание железа, %		
							Fe _{вал.}	Fe _{ис.}	Fe ₂
Аллювиальная-серогумусовая	AY	0–13	7,6	26,2	13,1	2,0	1,3	0,20	0,01
	C~	13–25	7,5	24,9	12,9	0,3	1,7	0,16	0,00
	[AY]	25–43	7,4	31,4	15,7	1,0	3,2	0,18	0,01
	[C~]	43–55	7,3	21,7	10,7	2,8	2,0	0,14	0,00
Дерново-подзол иллювиально-железистый псевдофибровый	O	0–2	6,3	23,6	11,9	1,7	4,3	0,16	0,02
	AY	2–9	6,5	18,8	9,5	0,7	1,4	0,17	0,02
	E	9–7(22)	4,8	7,1	3,5	0,3	0,8	0,08	0,01
	Bfff	17(22)–36	4,3	7,2	3,8	0,4	0,8	0,11	0,02
Торфяно-глеезём мелкоторфянистый поверхностно-оглееный	BC	36–55	3,5	9,0	4,4	0,3	1,9	0,15	0,01
	T	0–10	2,8	173,1	83,7	7,3	2,6	0,17	0,03
	CG~	10–20	5,7	16,8	8,2	2,7	1,8	0,20	0,02
	H	20–22	4,8	60,6	28,2	11,3	2,1	0,29	0,10
Погребенная серогумусовая криотурбированная мощная песчаная	[AY]	40–80	5,7	8,3	4,2	0,3	1,9	0,03	0,02
	[C@]	60	5,9	5,9	2,9	0,2	2,9	0,04	0,02
Дерново-подзол иллювиально-железистый языковатый псевдофибровый маломощный песчаный	AY	0–6(8)	5,6	18,4	9,1	1,3	0,3	0,08	0,01
	AYe	6(8)–11(20)	5,4	8,7	4,4	0,5	2,3	0,10	0,00
	E	11(20)–22(30)	5,4	8,0	4,0	0,4	1,0	0,13	0,02
	Ey	22(30)–51	5,3	6,3	3,6	0,4	1,1	0,08	0,01
Дерново-подзол иллювиально-железистый псевдофибровый среднемощный песчаный	Bfff	5–115	5,4	5,3	2,6	0,2	1,5	0,06	0,00
	O	0–2 (3)	5,9	26,3	13,0	5,5	1,9	0,09	0,00
	AY	2(3)–11(13)	6,0	17,3	8,6	0,5	1,1	0,04	0,02
	Ef	11(13)–30	5,4	11,4	5,7	0,3	4,3	0,00	0,00
Дерново-подбур иллювиально-железистый оподзоленный среднемощный песчаный	Bfff	30–55	5,7	11,7	5,9	0,3	2,3	0,02	0,00
	BF	55–100	5,1	10,9	5,5	0,2	1,0	0,09	0,02
	O	0–1	5,8	58,2	28,7	1,7	1,1	0,27	0,02
	BFe	12(14)–45	6,2	10,4	5,3	0,4	1,4	0,15	0,02
Серогумусовая ожелезнённая среднемощная песчаная со слаборазвитым профилем	C	45–98	5,9	17,7	8,8	0,2	0,3	0,06	0,00
	C'	98–120	6,7	16,8	8,5	0,2	2,1	0,07	0,00
	C	105–110	5,6	13,9	6,9	0,2	1,7	0,06	0,00
	Cf	15(18)–25(30)	5,8	20,8	10,3	0,4	0,8	0,08	0,01
Стратозём серогумусовый водно-аккумулятивный	Cf'	25(30)–38	5,6	13,9	7,1	0,2	1,2	0,14	0,01
	RYaq	0–37	6,8	140,3	70,3	2,6	1,3	0,26	0,09
	C~	37–42	6,5	41,8	21,1	0,5	0,5	0,13	0,02
	[W]	42–48	6,7	147,7	73,7	3,4	0,3	0,35	0,10

Продолжение таблицы 2

Псаммозём водно-аккумуля- тивный страти- фицированный песчаный	Cr1-aq, rz	2(4)–15	5,8	8,6	4,3	4,1	1,5	0,08	0,01
	[O]	15–18	5,1	107,9	54,5	2,2	2,3	0,19	0,04
	[T]	21–32	5,0	61,1	30,5	8,3	1,4	0,21	0,15
	[O]'	41–46	5,9	25,0	12,4	0,3	0,8	0,05	0,02
Псаммозём глееватый поверхностно- оглеенный песчаный	C	1–15	5,9	7,7	3,9	0,4	2,7	0,02	0,000
	Cg	15–30	6,1	12,8	6,4	0,5	0,8	0,02	0,01
Псаммозем глееватый мерзлотный	W	0–2	5,8	8,4	4,3	0,4	1,8	0,11	0,01
	Cg	2–17	5,7	11,8	5,9	0,2	1,2	0,16	0,01
	Cg ¹	17–28	5,3	9,5	4,8	0,3	1,2	0,19	0,02

Таблица 3. Гранулометрический состав почв долины реки Вилюй

Почва	Гори- зонт	Глубина, см	Содержание гранулометрических фракций диаметром (мкм), %							Физ. глина (< 10)
			< 1	1–5	5–10	10– 50	50– 250	250– 1000	> 1000	
Аллювиальная- серогумусовая	AY	0–13	7,5	43,5	18	23,7	7,3	0	0	69
	C~	13–25	10	46,6	20	13,4	9,4	0,6	0	76,6
	[AY]	25–43	7,6	37,9	15,6	21,3	17,6	0	0	61,1
	[C~]	43–55	4,2	17,3	7,5	6,1	32,6	32,3	0	29
Дерново-подзол иллювиально- железистый псевдофиб- ровый	O	0–2	1,8	8,3	5,4	16,7	32,6	35,2	0	15,5
	AY	2–9	6,8	27,9	13,9	42,8	8,6	0	0	48,6
	E	9–17(22)	9,6	36,8	16,2	21	14,5	1,9	0	62,6
	Bff	17(22)– 36	6,3	19,9	6,1	3,5	2,3	61,8	0,1	32,3
	BC	36–55	1,6	5,9	1,7	2,5	3,4	83,7	1,2	9,2
Торфяно- глеезём мелкоторфяни- стый поверхно- стно-оглеенный	T	0–10	1,1	6,3	4,2	16,6	40,3	31,3	0,2	11,6
	CG~	10–20	4,6	21,4	14,2	37,6	22,2	0	0	40,2
	H ¹	20–22	0,9	5,3	4,9	45	40,2	3,7	0	11,1
Погребенная серогумусовая криотурбиро- ванная мощная песчаная	[AY]	40–80	10,3	38,9	13,5	7,1	1,8	28,4	0	62,7
	[C@]	60	11,6	39,1	12,5	6,6	2,9	27,3	0	63,2
Дерново-подзол иллювиально- железистый языковатый псевдофибро- вый маломощ- ный песчаный	AY	0–6(8)	3,4	13,9	8,3	12,1	12,6	49,7	0	25,6
	AYe	6(8)– 11(20)	5,2	19,5	8,9	7	3,1	56,3	0	33,6
	E	11(20)– 22(30)	11,1	39,6	16,4	26	5,1	1,8	0	67,1
	Ey	22(30)– 51	7,5	28	8,7	4,9	1,2	49,6	0,1	44,2
	Bff	51–115	2,9	12,4	4,2	2,2	1,5	74,4	2,4	19,5
Дерново-подзол иллювиально- железистый псевдофибро- вый среднемо- щный песчаный	O	0–2 (3)	1,5	7,9	6	26,3	27,6	30,7	0	15,4
	AY	2(3)– 11(13)	9,8	41,4	21,4	17,8	2,3	7,3	0	72,6
	Ef	11(13)– 30	0,5	1,5	0,6	1,3	3,4	89,2	3,5	2,6
	Bff	30–55	4,3	16	5,6	3,2	2,8	67,9	0,2	25,9
	BF	55–100	11,2	45,1	17,7	13,7	7,2	5,1	0	74

Продолжение таблицы 3

Дерново-подбур иллювиально- железистый оподзоленный среднемощный песчаный	O	0–1	1,7	8,1	5,1	22,9	38,8	23,4	0	14,9
	BFe	12(14)– 45	10,5	40,1	17,2	21,3	10,3	0,6	0	67,8
	C	45–98	12,5	50,1	17,4	10,6	1,8	7,6	0	80
	C'	98–120	8,6	31	11,2	6,8	0,6	41,8	0	50,8
	C	105–110	7,1	26,2	11,7	8,2	0	46,8	0	45
Серогумусовая ожезнённая среднемощная песчаная со слабо развитым профилем	AY	0–15(18)	1	4,2	1,6	3,3	11,8	75,3	2,8	6,8
	Cf	15(18)– 25(30)	5,8	16,2	6,1	3,8	0	51,2	16,9	28,1
	Cf'	25(30)– 38	2,9	10,4	3,6	2,9	6,6	70,8	2,8	16,9
Стратозём серо- гумусовый водно- аккумулятивный	RYaq	0–37	4,6	23,2	14	55,4	2,8	0	0	41,8
	C [~]	37–42	6,4	29,7	16,7	29	18,2	0	0	52,8
	[W]	42–48	3,7	18,2	12,5	55,9	9,7	0	0	34,4
Псаммозём водно- аккумулятивный стратифициро- ванный песчаный	Cr1-aq, rz	2(4)–15	1,1	6,7	5,5	32,6	33,2	20,9	0	13,3
	[O]	15–18	10,2	42,2	18,6	12,2	15,5	1,3	0	71
	[T]	21–32	1,9	12,8	11,3	44,1	29,9	0	0	26
	[O]'	41–46	0,5	2	1	2	23,1	71,4	0	3,5
Псаммозём глееватый поверхностно- оглееный песчаный	C	1–15	0,2	0,8	0,5	1	5,3	89,2	3	1,5
	Cg	15–30	0,3	1,7	1,3	7,6	18,8	63,9	6,4	3,3
Псаммозем глееватый мерзлотный	W	0–2	7,5	28,9	10,3	9,2	6,8	37,2	0,1	46,7
	Cg	2–17	7,5	34,6	15	18,1	24,8	0	0	57,1
	Cg ¹	17–28	4,9	19,3	6,6	14	41,6	13,6	0	30,8

Общее содержание легкорастворимых солей и связанная с ним электропроводность распределены в почвах относительно равномерно, притом содержание солей мало, оно редко превышает 10,0 мг/л, соответственно, ЕС нечасто принимает значения выше 20,0 мкС/см. Среднее содержание солей в почвах составляет $14,7 \pm 19,3$ мг/л, а коэффициент вариации равен 1,3. Органогенные горизонты, как правило, незначительно обогащены водорастворимыми солями (на 3–5 мг/л), однако встречаются также весьма высокие значения (до 83,7 мг/л), приуроченные к торфяным и погребённым грубогумусовым горизонтам (табл. 2). В профилях значения ЕС и TDS распределены с максимумами в верхней части и с монотонными распределениями в нижних.

Очевидно, что поверхностные горизонты почв содержат наибольшие (до 11,3%) концентрации $C_{орг}$. В глубоких горизонтах почв, незначительно затронутых почвообразовательными процессами, содержания $C_{орг}$ снижаются и далее распределяются равномерно (концентрации около 0,3–1,0%), за теми лишь исключениями, что в погребённых органических горизонтах (от 1,0 до 11,3%) эти значения сильно вырастают. При средней концентрации органического углерода равной 1,5% стандартные отклонения равны $\pm 2,4\%$, а коэффициент вариации составляет 1,6 (табл. 2).

Среди рассмотренных фракций железа несиликатная фракция сосредоточена в изученных почвах в концентрациях, в 11 раз больших, чем аморфная фракция. Диапазон концентраций фракции $Fe_{нс}$ составляет 0,35%, что примерно в 2,5 раза выше, по сравнению с диапазоном концентраций Fe_a . Предположительно, доля аморфной фракции железа в составе несиликатной группы соединений столь низка из-за небольшой глубины почвообразования, в результате чего содержание органического углерода низко (особенно в минеральной части почвенных профилей).

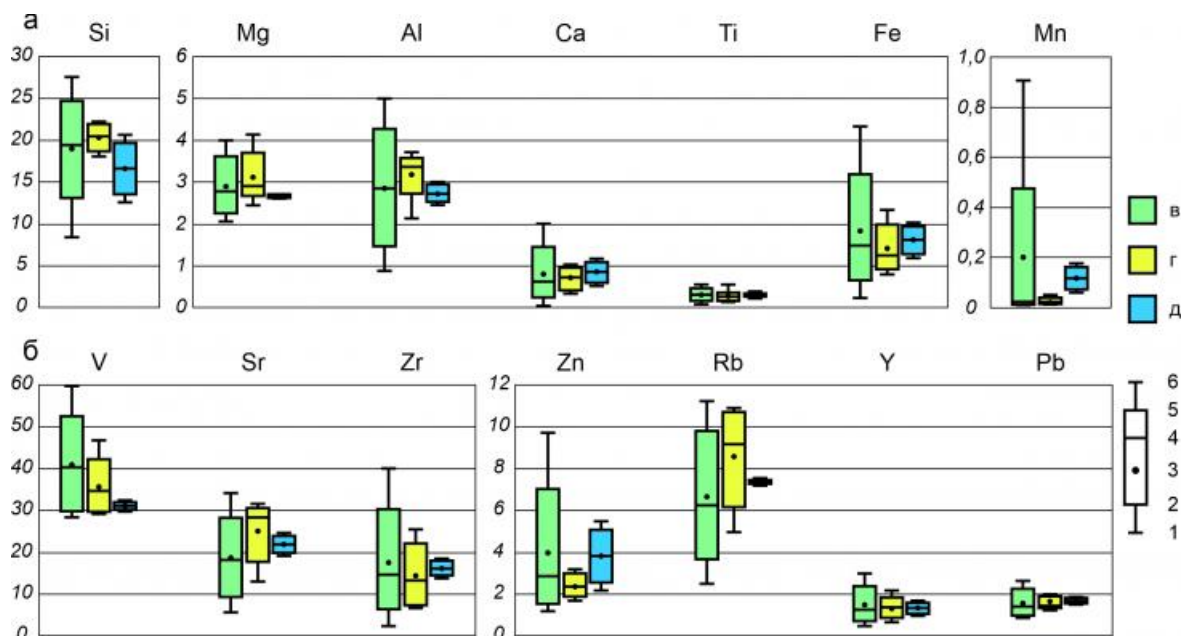


Рис. 4. Диаграммы «ящик с усами», демонстрирующие статистические показатели макро- (г/кг) (а) и микроэлементного (мг/кг) (б) состава сезонно-талых (в), сезонно-талых криогенных (г) и многолетнемёрзлых горизонтов почв (д): 1 – минимальные значения; 2 – квартиль 25%; 3 – средние арифметические; 4 – квартиль 50%; 5 – квартиль 75%; 6 – максимальные значения

Практически во всех случаях из рассмотренных содержания всех изучаемых химических элементов варьируют в более широких пределах, чем их же содержания в криогенных и многолетнемёрзлых горизонтах (рис. 4). Связано это, скорее всего, с повышенными содержаниями элементов в поверхностных органогенных горизонтах почв, что характерно особенно для элементов с повышенной склонностью к ассоциированию с органическим веществом и сорбции на коллоидах органической природы – Ca (до 1,3 г/кг), Mn (до 0,14 г/кг), Fe (до 4,3 г/кг) и др. Именно с этими пиками связаны повышенные максимальные значения концентраций этих металлов, отражённые на рис. 4, и с ними же связано то, что границы квартилей содержания Fe, Mn, V, Zr и Zn смещены к нижней границы амплитуды концентраций.

Многие средние содержания элементов в криогенных горизонтах сезонно-талого слоя почв меньше, по сравнению с сезонно-талыми горизонтами (см. рис. 4). Исключение составляют лишь средние концентрации Si, Al, Sr и Rb, которые, по-видимому, преимущественно входят в состав первичных, устойчивых к выветриванию минералов. Низкие (Ca – 0,7 г/кг в среднем, Ti – 0,2 г/кг в среднем, Mn – 0,03 г/кг в среднем, Y – 1,4 мг/кг, Pb – 1,7 мг/кг в среднем) содержания этих элементов в минеральных горизонтах, связаны в первую очередь с разрушением минеральных зёрен при промерзании почв в зимний период. Криогенная деструкция минералов отмечалась ранее в различных районах криолитозоны. [\[16,34,35\]](#) После разрушения криогенными процессами многие из этих элементов, входящие в состав частиц почвы, перемещаются вниз по профилю с водными потоками, после чего аккумулируются в надмерзлотном и многолетнемёрзлом горизонтах (Ca – 0,9 г/кг, Ti – 0,3 г/кг, Fe – 1,6 г/кг, Mn – 0,1 г/кг (рис. 4а), Zr – 16,2 мг/кг, Zn – 3,9 мг/кг (см. рис. 4,б) в среднем).

Наиболее широко в многолетнемёрзлых горизонтах почв варьируют Si и Zn (18,2 – 22,3 г/кг и 1,7 – 3,2 мг/кг). Остальные же элементы распределены в многолетнемёрзлых горизонтах в значительно более узких пределах. Накоплению элементов в горизонте многолетнемёрзлых пород способствуют как термодинамические (мёрзлое состояние

горизонта) свойства, так и возникающая в связи с ними восстановительная обстановка.^[13] Таким образом, мерзлота выполняет биосферную функцию радиального геохимического барьера,^[28] на котором осаждаются Al, Si, Ca, Mn, Fe.

3.2. Почвенные профили и радиальная дифференциация химического состава почв

Различные свойства почв создают разнообразие профильных распределений значений коэффициента R . Большая часть изученных элементов распределена в профилях (рис. 5) автоморфных почв (см. рис. 5,г и 5,д) распределена с накоплением в минеральных горизонтах, а из поверхностного органогенного горизонта дерново-подзола иллювиально-железистого языковатого они активно выносятся (значения R варьируют в пределах от 0,1 до 0,8), кроме Si, повышенное значение R которого (см. рис. 5, д) связано, скорее всего, с невысокой мощностью самого горизонта АУ и перемешанностью его с нижележащим песком. Наиболее сильно в профилях почв накоплены такие элементы, как Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Zr, значения R которых достигают 20,0 (см. рис. 5,л). Промывной тип водного режима почв песчаного и супесчаного гранулометрического состава обеспечивает активную радиальную водную миграцию веществ в профилях большей части изученных разрезов. Этим объясняется пониженное содержание элементов в горизонтах Е (а также с признаком е) и С, в особенности это проявляется в горизонте С дерново-подбуря (см. рис. 5,ж), в котором рассеяны (R варьирует от 0,1 до 0,9) практически все рассмотренные элементы, за исключением Si, высокое содержание которого также связано с песком в гранулометрическом составе, который имеет кремнезём (SiO_2) в своей основе. Остальные элементы, в особенности Mg, Ti, Fe, V и Pb, накапливаются в надмерзлотном тёмноцветном горизонте С' ($R = 1,1-1,5$). Псевдофибровые горизонты альфегумусовых почв часто отличаются аналогичных по морфологии и физико-химическим свойствам более высокими содержаниями химических элементов, по сравнению с непсевдофибровыми. Так была отмечена предполагаемая роль железосодержащих частиц в транслокации ионных форм других металлов. Повышенное содержание как валового, так и аморфного железа, фаза которого отличается способностью к ассоциации с микроэлементами ($RTi = 1,0-1,8$; $RMg = 1,0 - 1,4$; $RMn = 1,0-33,0$ и др.). Ca среди всех прочих химических элементов демонстрирует одну из самых устойчивых тенденций к поверхностно-аккумулятивному типу распределения. По-видимому, концентрации Ca находятся в прямой корреляционной зависимости от глубины почвообразования. RCa в горизонтах W, O и АУ равны 0,5 – 10,0. Суглинистый гранулометрический состав, проявляющийся, к примеру, в водно-аккумулятивном горизонте RYaq, способствует накоплению всех из изученных элементов, кроме Si, Ca, V и Zn. Высокое содержание органических веществ (Сорг. = 2,57%) и повышенная электропроводность (ЕС = 140 мкС/см) в совокупности с утяжелённым гранулометрическим составом приводят к тому, что R здесь равен 1,3–3,7 (см. рис. 5,и). Многолетнемёрзлые горизонты почв характеризуются повышенными концентрациями практически всех элементов, в особенности макроэлементов, в сравнении с надмерзлотными (см. рис. 5,в и 5,м). При этом, скорее всего, степень развитости органогенного горизонта и его разложения влияет на интенсивность сорбции металлов и металлоидов органическим веществом. Так, грубогумусовый горизонт W в псаммозёме глееватом мерзлотном пропускает большую часть поступающих в него элементов ($R = 0,5-1,0$), а сильноразложенный T в торфяно-глеезёме мелкоторфянистом аккумулирует большую часть поступающих химических веществ, в особенности Si, V и Zr ($R = 1,5, 1,7$ и 2,0).

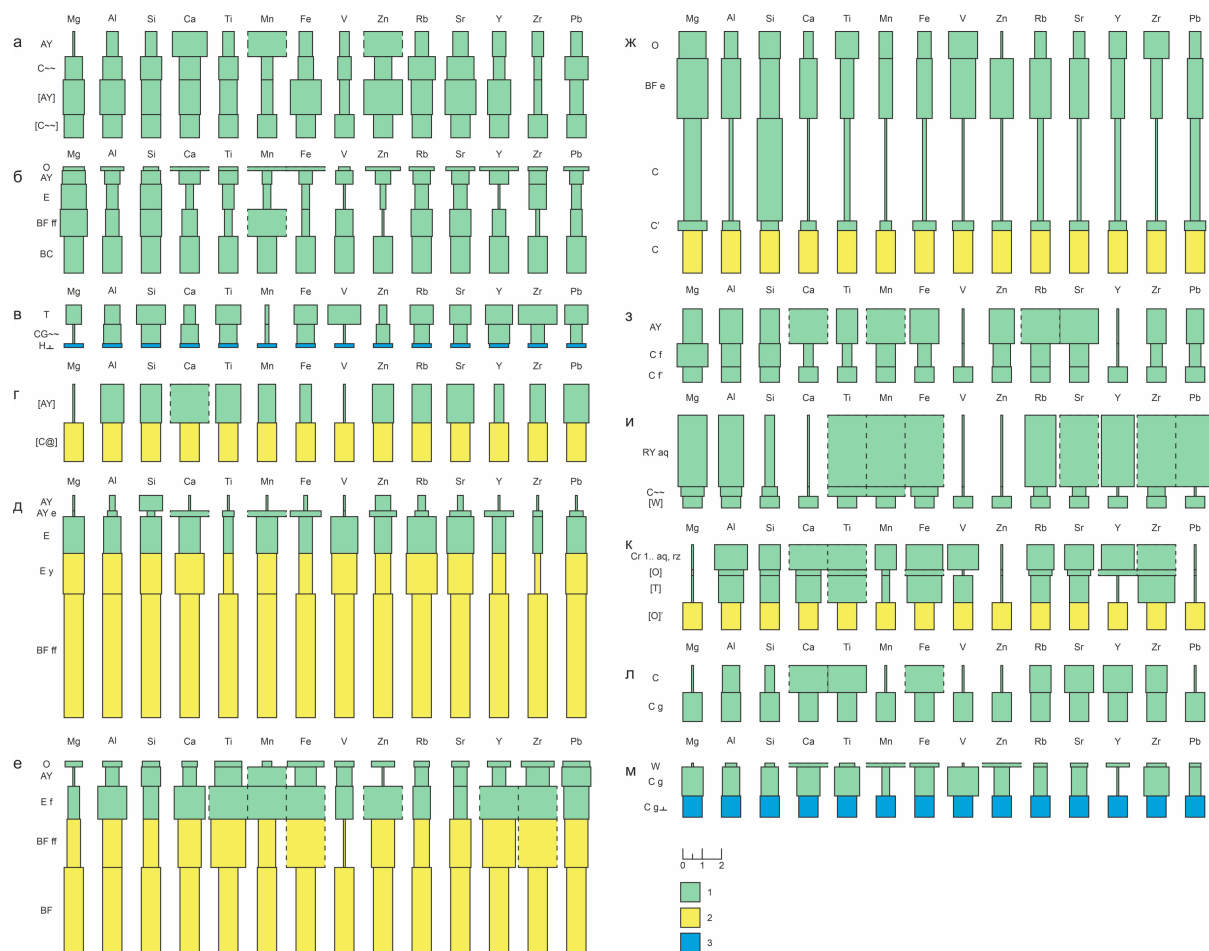


Рис. 5. Значения коэффициента радиальной дифференциации (R) профилей почв в долине реки Вилюй: а) аллювиальная серогумусовая; б) дерново-подзол иллювиально-железистый; в) Торфяно-глеизём мелкоторфянистый; г) погребённая серогумусовая; д) дерново-подзол иллювиально-железистый языковатый; е) дерново-подзол иллювиально-железистый псевдофибровый; ж) дерново-подбур иллювиально-железистый; з) серогумусовая ожелезнённая; и) стратозём серогумусовый; к) псаммозём водно-аккумулятивный; л) псаммозём глееватый; м) псаммозём глееватый мерзлотный; 1 – сезонно-талые некриогенные горизонты; 2 – сезонно-талые криогенные горизонты; 3 – многолетнемёрзлые горизонты

3.3. Почвенно-геохимическая катена и латеральная дифференциация химического состава почв

Почвенно-геохимическая катена, заложенная на левом берегу реки Вилюй, состоит из пяти сопряжённых элементарных геохимических ландшафтов (ГХЛ) (рис. 6). Подробное описание природных условий заложения разрезов и вскрытых ими почвенных профилей представлено в работе [\[31\]](#).

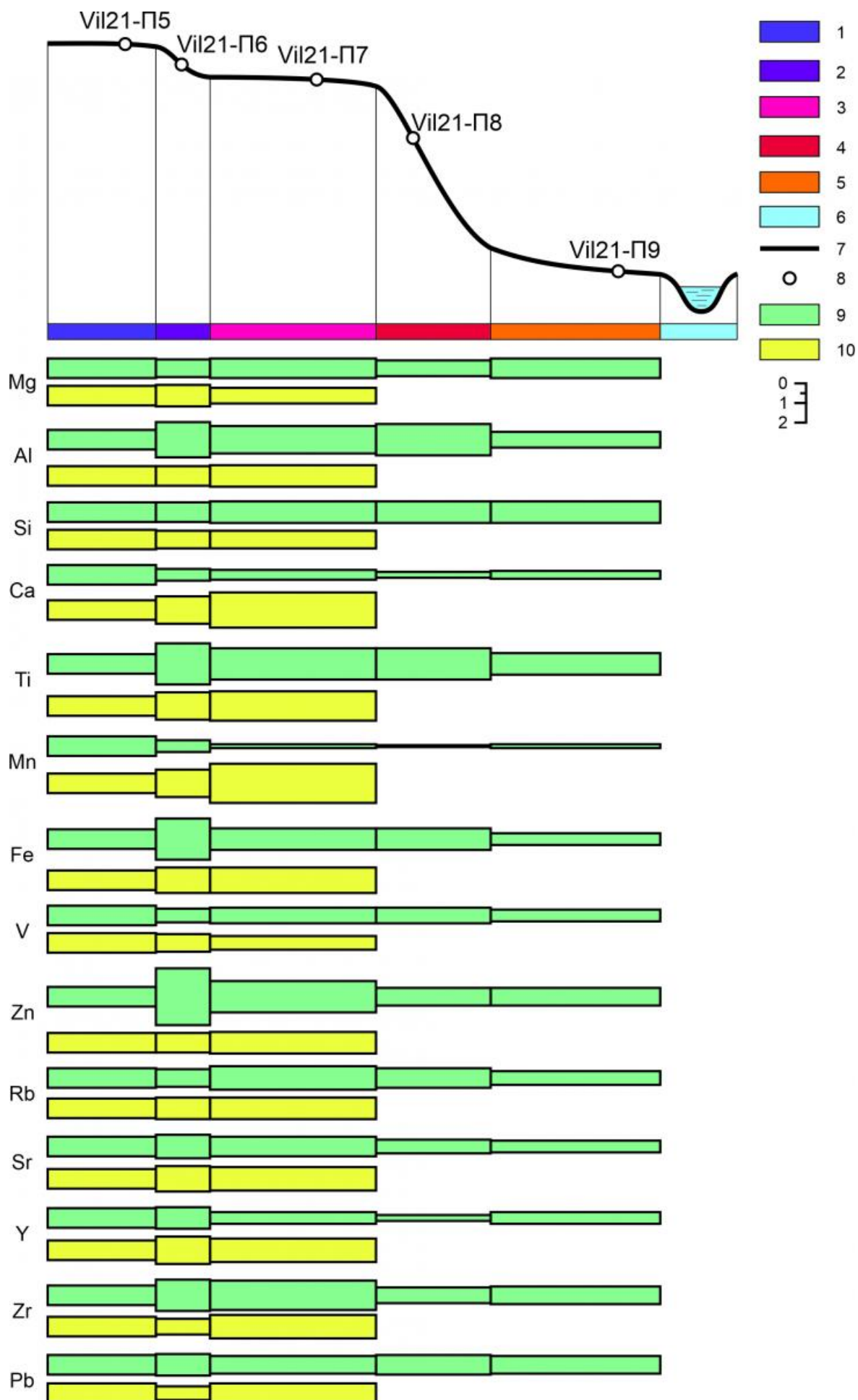


Рис. 6. Значения коэффициента латеральной дифференциации (L) в элементарных

геохимических ландшафтах катены в долине реки Вилюй: 1 – элювиальный первого порядка ГХЛ; 2 – трансэлювиальный со слабым выносом ГХЛ; 3 – элювиальный второго порядка ГХЛ; 4 – трансэлювиальный с активным выносом ГХЛ; 5 – супераквальный транзитный ГХЛ; 6 – аквальный ландшафт реки Вилюй; 7 – профиль рельефа; 8 – местоположения заложённых почвенных разрезов; 9 – сезонно-талые горизонты почв; 10 – криогенные горизонты почв

В изученных почвах пределы варьирования коэффициентов латеральной дифференциации химических элементов весьма широки. Наиболее широко распределены в почвах катены Ca ($LCa = 0,3 - 1,8$; $LMn = 0,1 - 2,0$; $LFe = 0,6 - 2,1$; $LZn = 0,9 - 2,9$ и $LY = 0,3 - 1,4$). Многие элементы из изученных, такие как Al , Ti , Fe , Zn и Zr , аккумулируются в криогенных элювиальных ожелезнённых и псевдофибровых горизонтах подзолов на пологом склоне первой надпойменной террасы, что также может быть связано с повышенным содержанием железа и его аморфных форм (см. табл. 2). Повышенное содержание железа и алюминия в этих горизонтах также объясняется как высокими (относительно среднепрофильных) содержаниями крупных гранулометрических фракций диаметрами 250–1000 мкм до 89,2%, поскольку слаботоразрушенные в процессе криогенеза первичные минералы, содержащие Al и Fe в своих кристаллических решётках, содержатся здесь в высоком количестве. Накопление же микроэлементов – Zn , Y и др. – в них объясняется, скорее всего, наличием сорбционного латерального геохимического барьера, поскольку в горизонте B_{ff} содержится до 26% фракции физической глины, обладающей повышенной сорбционной способностью. Для большей части химических элементов в рассмотренной почвенно-геохимической катене характерно концентрирование в верхней части в результате преобладания там радиальной миграции веществ, а также степени развития гумусового горизонта, выступающего на пути миграции в качестве радиального сорбционно-биогеохимического барьера. В дерново-подбурах на первой надпойменной террасе Вилюя, особенно в криогенных горизонтах, сосредоточено большое количество Ca , Mn и Ti – $LCa = 1,8$, $LTi = 1,5$ и $LMn = 2,0$, соответственно. Это также связано с высокими концентрациями несиликатного и аморфного Fe наряду довольно высокими (до 50,8%) содержаниями физической глины. Ниже по склону катены горизонты с признаками криогенеза не распространены в связи с почти полным отсутствием экранирующей поверхности растительного покрова (на склоне первой террасы Вилюя) и отепляющим влиянием речной воды (в супераквальном ГХЛ поймы). В серогумусовой почве на склоне террасы многие элементы рассеяны (см. рис. 6), например, $LMg = 0,8$, $LCa = 0,3$, $LMn = 0,1$ и т.д. Особенно слабо в горизонтах этой почвы концентрирован Mn . По-видимому, весьма лёгкий гранулометрический состав почвы, малая мощность горизонтов, неглубокое проникновение почвообразование и другие факторы не способствуют развитию здесь контрастных геохимических барьеров. Большая часть элементов в почвах поймы Вилюя рассеяна ($L = 0,4 - 0,9$), Mg , Si и Ti распределены либо равномерно, либо с незначительным накоплением в мощном водно-аккумулятивном органогенном горизонте и лежащих ниже горизонтах, также обогащённых $C_{орг}$. (концентрации до 3,4%) (см. табл. 2) и глинистыми частицами (до 52,8%) (см. табл. 3).

4. Дискуссия

4.1. Профильные распределения геохимических свойств почв

Аналогично полученным нами результатам, Т.И. Васильева получила следующие результаты химического анализа почв Центральной Якутии: наибольшие концентрации среди макроэлементов имеют такие элементы (приведённые к полуторным оксидам), как

Si (60,8–84,2%), Al (8,3–16,9%), Fe (1,1–5,8%). Ca характеризуется аналогичными Fe концентрациями (0,9–5,0%), что объясняется отношением исследованных почв к типам палевые и чернозёмы, для которых характерно развитие на карбонатных почвообразующих породах. Соответственно, основным карбонатным соединением, входящим в их состав, является CaCO_3 – карбонат кальция. Содержание Ca в исследованных нами почвах, в основном относящихся к альфегумусовым (дерново-подзолы, дерново-подбуры), редко превышает 2%, что связано как раз со сниженным содержанием кальцита в почвообразующих породах. Основная часть элементов, за исключением Ca, в основном сосредоточенного в нижних горизонтах (Vca, C, Cca и т.п.), распределена в профилях почв равномерно, что особенно характеризует Si, составляющий основную часть порообразующих минералов – кремнезём (SiO_2). Также весьма высокие концентрации Si (SiO_2) и Al (Al_2O_3) – до 84,2 и 15,5%, соответственно, были отмечены А.П. Чевычеловым [\[32\]](#). Профильные распределения микроэлементов в фоновых почвах алмазодобывающих провинций Якутии характеризуются одной общей чертой – активным накоплением Li ($R = 3,3 - 3,6$), Ti (R до 16,6), V ($R = 3,3 - 3,6$), Cr ($R = 2,2-4,9$) и др. в надмерзлотных и мерзлотных горизонтах. Наименьшими значениями коэффициента R по данным Я.Б. Легостаевой и А.Г. Гололобовой, характеризуется Sn (в большинстве случаев) и Pb – R достигает 1,5–1,7. Органические вещества связываются в комплексы с Pb (R в органогенном горизонте = 1,2–1,8) и As ($R = 1,1-10,0$), что является наиболее часто наблюдаемой закономерностью в профилях криозёмов Ханья-Накынского междуречья. Ni, Cd и Cu в основном выносятся из почвенного профиля, демонстрируя слабую способность к сорбции органическим веществом (R по данным А.Г. Дягилевой варьируют в диапазоне от 0,4 до 0,9).

4.2. Катенарные распределения геохимических свойств почв

В таёжно-лесостепной почвенно-геохимической катене в приленском районе Центральной Якутской низменности были выявлены следующие характеристики латерального распределения элементов: Si распределён в почвах катены относительно равномерно ($0,8 < L < 1,3$), у Al наблюдается слабый вынос из почв автономных ландшафтов возвышенностей, накопление алюминия происходит в почвах склоновых и супераквальных геохимических ландшафтов с коэффициентом $L = 1,1 - 1,4$. Fe демонстрирует интенсивный вынос из почв автономных ландшафтов (содержания от 0,5 до 2,7%) с накоплением в нижней части почвенно-геохимической катены (концентрации до 5,4–5,8%) – значения коэффициента R достигают 2–5 единиц. Причём значения R в нижних горизонтах почв обычно значительно выше, чем в верхних. Катенарные распределения Ca и Mg в целом аналогичны закономерностям распределения Fe, отличие заключается в том, что верхние, особенно органогенные, горизонты почв, обогащённые кальцием, в сравнении с нижними минеральными горизонтами. Ti и Mn распределены в почвах ландшафтно-геохимической катены относительно равномерно ($0,7 < L < 1,2$). [\[32\]](#)

5. Заключение

Авторами изучены закономерности профильных (радиальных) и катенарных (латеральных) распределений геохимических свойств криогенных почв, разрезы которых были заложены в долине р. Вилуй в среднем её течении. Для этого были применены геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации – R и L .

Различные свойства почв создают в изученных почвах широкое разнообразие вариантов профильных распределений, несводимое к единообразным закономерностям. Для

большей части элементов, рассмотренных в почвах, характерно элювиально-иллювиальное распределение в профилях автоморфных почв. Они характеризуются значениями коэффициента радиальной дифференциации R от 0,1 до 0,8. Исключение составляет Si. Наиболее сильно в профилях почв накоплены Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Zr, значения R которых в почвах достигают значений около 20,0. Элювиальные горизонты в целом отличаются выносом большей части элементов ($R = 0,1-0,9$), а Si вновь является исключением, поскольку входит в состав кремнезёма – минеральной основы почвенных частиц в песчаных почвах. Mg, Ti, Fe, V и Pb, накапливаются в надмерзлотном тёмноцветном горизонте C' ($R = 1,1-1,5$). Псевдофибровые горизонты почв отличаются аналогичных по морфологии и физико-химическим свойствам более высокими содержаниями химических элементов. Так была отмечена предполагаемая роль железосодержащих частиц в транслокации ионных форм других металлов: Ti, Mg, Mn ($RTi = 1,0 - 1,8$; $RMg = 1,0 - 1,4$; $RMn = 1,0 - 33,0$ и др.). Суглинистый гранулометрический состав водно-аккумулятивного горизонта $RYaq$ в стратозёме на пойме Вилюя способствует накоплению всех из изученных элементов, кроме Si, Ca, V и Zn. Многолетнемёрзлые горизонты почв характеризуются повышенными концентрациями практически всех элементов, в особенности макроэлементов.

Пределы варьирования коэффициентов L химических элементов весьма широки в исследованных почвах. Самыми широкими пределами варьирования отличаются Ca, Mn, FeZn и Y ($LCa = 0,3 - 1,8$; $LMn = 0,1 - 2,0$; $LFe = 0,6 - 2,1$; $LZn = 0,9 - 2,9$ и $LY = 0,3 - 1,4$). Такие элементы, как Al, Ti, Fe, Zn и Zr, аккумулируются в криогенных горизонтах подзолов на пологом склоне первой надпойменной террасы (ТЭ1 ландшафт), что, предположительно, связано с повышенным содержанием железа и его аморфных форм. Накопление микроэлементов – Zn, Y и др., – объясняется наличием сорбционного латерального геохимического барьера. Для большей части химических элементов в рассмотренной почвенно-геохимической катене характерно концентрирование в верхней части. В дерново-подбурах на первой надпойменной террасе Вилюя, особенно в криогенных горизонтах, сосредоточено большое количество Ca, Mn и Ti – $LCa = 1,8$, $LTi = 1,5$ и $LMn = 2,0$, соответственно. В серогумусовой почве на склоне террасы (ТЭ3 ландшафт) многие элементы рассеяны, например, $LMg = 0,8$, $LCa = 0,3$, $LMn = 0,1$ и т.д. Малая мощность горизонтов, неглубокое проникновение почвообразования и другие факторы не способствуют развитию здесь контрастных геохимических барьеров.

Использование коэффициентов латеральной и радиальной дифференциации представляется нам перспективным методом для составления характеристики почвенно-геохимической структуры территорий – определения характерных особенностей профильного распределения концентраций элементов в почвах, распределения элементов в элементарных геохимических ландшафтах, индикации вертикальных и горизонтальных геохимических барьеров и т.п. Тем не менее, в отдалённых районах криолитозоны Якутии, в том числе, в Центральной Якутской низменности, подобные работы немногочисленны. Валовой химический состав профилей мерзлотных почв исследован чаще, по сравнению с элементным составом почвенно-геохимических катен. При этом исследований, дифференцирующих горизонты почв на мерзлотные и немерзлотные практически отсутствуют, таким образом, весьма слабо исследовано влияние криогенных процессов на химический состав. Более активное использование методики, предложенной нами в данной статье, способно расширить современные представления о криогенной дифференциации валового состава химических элементов в почвах. Также детальный анализ фракционного (группового) состава отдельных элементов могут иметь диагностическое значение при изучении криогенеза почв и его влияния на почвообразование.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.б.н. М.И. Герасимовой и м.н.с. Дж.Ю.Васильчук за помощь в диагностировании и классифицировании почв, научному сотруднику ЭГЦ географического факультета МГУ Е.В. Терской и инженеру Л.В. Добрыдневой за помощь в проведении лабораторных работ, к.г.-м.н. Н.В. Торговкину за организацию летней полевой школы-семинара, а также А.Д. Белик и Е.Г. Егорову за помощь в полевых работах.

Библиография

1. 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.
2. Варламов С.П., Скрябин П.Н. Динамика теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14, №1 (8). С. 2040–2044.
3. Васильчук Ю.К., Васильчук Дж.Ю., Гинзбург А.П. Криогенные почвы в долине р. Вилюй, Якутия // Арктика и Антарктика. 2021. № 3. С. 80–105. doi: 10.7256/2453-8922.2021.3.36671.
4. Габышев В.А., Габышева О.И. Особенности развития фитопланктона и физико-химических свойств воды среднего и нижнего Вилюя и Светлинского водохранилища // Экологическая оценка и картографирование. 2011. № 3. С. 45–54.
5. Габышева Л.П. Характеристика сосновых лесов тукуланов Лено-Вилюйского междуречья // Успехи современного естествознания. 2020. №10. С. 7–13.
6. Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов П.В. Криогенные процессы и изменение устойчивости пород ледового комплекса в Центральной Якутии при современном изменении климата и нарушении поверхности // Наука и образование. 2005. № 4 (40). С. 84–87.
7. Геокриология СССР. Средняя Сибирь /под ред Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 414 с.
8. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. – М.: Недра, 1970. – 383 с.
9. Государственная геологическая карта России (новая серия) в масштабе 1:1 000 000. Лист Р-50,51 (Олёкминск). Карта дочетвертичных образований / Комитет по геологии и использованию недр при правительстве Российской Федерации (составлена в ВСЕГЕИ имени А.П. Карпинского; авторы: Ковригина Е.К., Штейн Л.Ф., Семёнов Ю.Г., Зарубин А.С., Семериков А.А., Камалетдинов В.А.; картографы-составители: Сай Т.С., Круглова Л.И.; редактор: Ковригина Е.К.). Росгеолком, 1992.
10. Захарова В.И., Никифорова Е.Н. Флора и растительность окрестностей дефляционного озера Быранатталах (низовье р. Вилюй, Центральная Якутия) // Вестник СВФУ. 2016. № 1 (51). С. 5–14.
11. Иванов В.А., Рожин И.И. Моделирование деградации многолетнемёрзлых пород при потеплении климата в условиях Центральной Якутии на ближайшие 300 лет // Современные наукоёмкие технологии, 2021. № 10. С. 41–47.
12. Карта распространения криогенных процессов Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 5 000 000 / Фёдоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Калиничева С.В., Башарин Н.И., Константинов П.Я., Самсонова В.В.; гл. ред. М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН. 2018. 1 л.

13. Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарёва Г.Л. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 6. С. 20–27.
14. 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.
15. Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009. № 4. С. 10–20.
16. Конищев В.Н., Рогов В.В. Влияние криогенеза на глинистые минералы // Криосфера Земли, 2008. Т. XII, № 1. С. 51–58.
17. Куть А.А. Эолово-мерзлотные образования (тукуланы) Центральной Якутии: строение, генезис, возраст, закономерности распространения / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. Якутск. 2015. 23 с.
18. Лебедева Л.С., Ефремов В.С., Христофоров И.И., Бажин К.И., Огонеров В.В., Павлова Н.А. Талики и формирование речного стока на малом водосборе в сплошной криолитозоне Якутии // Материалы международной научной конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии» (Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г.). 2018. С. 62–66.
19. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред. М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л.
20. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Многолетние данные. Якутская АССР. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Сер. 3. К. 1. Ч. 1–6. Вып. 24. 606 с.
21. Национальный атлас России. В четырех томах [Карты] / редкол.: А.В. Бородко (пред.), В.В. Свешников (гл. ред.) и др. – Москва: Роскартография. 2004–2008.
22. Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. Влияние динамики снежного покрова на рост и развитие лесов в центральной Якутии // Криосфера Земли, 2011. Т. XV. № 3. С. 71–80.
23. Николаев А.Н., Угаров И.С. Различия режима увлажнения мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии и его влияние на рост лиственниц // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. Т. 13, №1 (4). С. 1016–1019.
24. Николаева Н.А. Устойчивость ландшафтов бассейна р. Вилюй в Западной Якутии // Успехи современного естествознания, 2020. № 11. С. 88–94.
25. Основы биогеохимии: Учеб. пособие для геогр., биол., геолог., с.-х. спец. вузов. – М.: Высш. шк. 1998. – 413 с.
26. Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Баишев Н.Е. Результаты рекогносцировочного обследования источников подземных вод тукулана Махатта // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022.
27. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк. 1975. 394 с.
28. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель. 1999. 764 с.
29. Пермьяков П.П., Варламов С.П., Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б. Численное моделирование термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Наука и образование. 2016. № 2. С. 43–48.
30. Полевой определитель почв. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. 2008. – 182

с.

31. Сафронов А.Ф., Берзин А.Г., Фрадкин Г.С. Тектоническая природа локальных поднятий Вилуйской синеклизы // Геология нефти и газа, 2003. №4. С. 20 – 28.
32. Чевычелов А.П. Мерзлотные почвы Центральной Якутии: география, генезис и разнообразие // Материалы VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ «Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове» (Томск, 14–19 сентября 2020 г.). Издательский дом ТГУ, 2020. С. 98–101.
33. Шофман И.Л., Кинд Н.В., Пахомов М.М., Прокопчук Б.И., Виноградова С.Н., Сулержицкий Л.Д., Форова В.С. Новые данные о возрасте отложений низких террас в бассейне р. Вилуй // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. №47 1977. С. 100–107.
34. Шестернев Д.М. Физическое и химическое выветривание массивов горных пород в криолитозоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 350–360.
35. Шмелёв Д.Г. Криогенез рыхлых отложений полярных областей Земли / Диссертация на соискание учёной степени кандидата географических наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, 2015. 155 с.
36. Fedorova S., Kryzhanovsky A. Combined scheme of permafrost water purification in Central Yakutia // IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering, 2020. 953, 012025. 9 pp. doi:10.1088/1757-899X/953/1/012025.
37. The Far North: Plant biodiversity and Ecology of Yakutia. Plant and Vegetation 3. Springer Science + Business Media B.V., 2010. 390 p. doi: 10.1007/978-90-481-3774-9.
38. <http://pogodaiklimat.ru/history/24641.htm>

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Район Центральной Якутии в среднем течении реки Вилуй является одним из уникальных по сочетанию развитых здесь криогенных процессов – морозобойного растрескивания, термосуффозии, термокарста, термоэрозии, солифлюкции, морозной сортировки, наледеобразования, поэтому получение данных о криогенном факторе формирования и динамики геохимических свойств местных почв является актуальным. Предметом исследований являлись почвы на территории Вилуйского округа Центрально-Якутской средне-таёжной подпровинции подзоны средне-таёжных лесов. На этой территории было выделено 9 зональных, 2 азональных и 7 интразональных типов почв, отмечается, что столь высокое разнообразие почвенного покрова является действие индивидуальных почвообразовательных макропроцессов на фоне криогенеза, типичного как для Центральной Якутии, так и в целом для криолитозоны. В процессе исследований были заложены 12 разрезов почв в различных ландшафтных условиях от плоской поверхности второй надпойменной террасы Вилуя до днищ малых эрозионных форм и термосуффозионных воронок. Пять разрезов из 12 составили почвенно-геохимическую катену левобережья Вилуя. 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. 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 и Полевом определителе почв. Полевые названия почв также были даны исходя из сочетаний диагностических генетических горизонтов и признаков, указанных в Полевом определителе почв. В упакованном состоянии пробы были доставлены в химико-аналитическую лабораторию эколого-геохимического центра географического факультета МГУ, где были определены для всех проб: гранулометрический состав; кислотность водных вытяжек; общее содержание легкорастворимых солей; общее содержание органического углерода; Концентрации не силикатного и аморфного железа; валовые содержания макро- и микроэлементов.

Для характеристики пространственной неоднородности химического состава почв были использованы геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации. В результате комплексных исследований установлено, что изученные почвы относятся к стволам син- (аллювиальная серогумусовая) и постлитогенного почвообразования (остальные почвы). Скорости аккумуляции речных наносов в аллювиальных почвах сопоставимы с темпами почвообразования, что приводит к циклическому характеру почвообразования в них. Почвы постлитогенного ствола относятся к следующим типам: дерново-подзолы и дерново-подбуры (почвы, развивающиеся на возвышенных участках рельефа – надпойменных террасах и их склонах), торфяно-глеезёмы (во влажных днищах малых эрозионных форм рельефа – оврагов и балок), серогумусовые, в том числе, погребённые под золовыми наносами на тукуланах, а также стратозёмы на речных поймах и псаммозёмы – на заболоченных и обводнённых участках внутри термосуффузионных воронок.

Научная новизна работы заключается в изучении закономерности профильных (радиальных) и катенарных (латеральных) распределений геохимических свойств криогенных почв, разрезы которых были заложены в долине р. Вилуй в среднем её течении. Для этого были применены геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации. Показано, что различные свойства почв создают в изученных почвах широкое разнообразие вариантов профильных распределений, несводимое к единообразным закономерностям.

Практическая ценность статьи заключается в том, что активное использование методики, предложенной авторами, способно расширить современные представления о криогенной дифференциации валового состава химических элементов в почвах.

Стиль структура и содержание статьи отвечают требованиям, предъявляемым к публичному представлению результатов научных исследований. Библиографический список достаточно полон и отражает современное состояние исследований в рассматриваемой области. Статья будет несомненно интересна и полезна специалистам а области геокриологии. В качестве замечания следует указать на неинформативность таблиц 1 и 2 в представленном в статье виде. В целом статья написана на хорошем методическом и научном уровне, имеет научную и практическую ценность, соответствует научному направлению журнала и рекомендуется к публикации.